

様式 6

論文目録

報告番号	甲 工 乙 工 工 修	第 119 号	氏 名	野 口 真 児
学位論文題目	ファジィ推論を用いた高所作業車のモデリングと制御に関する研究			
論文の目次 第 1 章 緒 言 第 2 章 高所作業車 第 3 章 ファジィ制御を用いた単軸位置制御システム 第 4 章 ファジィ制御を用いた多軸協調制御システム 第 5 章 ファジィモデリング 第 6 章 結 言 参考文献 主論文 1) 野口，鏡原，鎌野，鈴木，安野：「ファジィ制御による高所作業車の高精度複合動作」，電気学会論文誌 C，Vol.117-C，No.11，pp1573-1579，1997，11 2) 野口，谷住，鎌野，鈴木，安野：「電気油圧サーボ系における自己調整ファジィコントローラのルール数低減化法」，油圧と空気圧，Vol.28，No.7，pp785-791，1997，11 副論文 1) S.Noguchi，K.Kagamihara，S.Isono，T.Kamano，T.Suzuki，T.Yasuno:「High Performance Control of Construction Machine using Self-Tuning Fuzzy Technique」，Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation，A Pacific Rim Conference，pp379-382，Boston，U.S.A.，1996，7 2) 野口，鏡原，鎌野，鈴木，安野：「自己調整ファジィコントローラを用いた高所作業車の高精度複合動作」，日本機械学会第 6 回インテリジェントシンポジウム 225，1996，10 3) 福見，鎌野，鈴木，安野，野口：「ファジィコントローラを用いた二自由度位置制御システム」，ファジィ学会第 13 回ファジィシンポジウム WEA3-3，1997，6				

備考

- 1 論文題目は，用語が英語以外の外国語のときには日本語訳をつけて，外国語，日本語の順に列記すること。
- 2 参考文献は，論文題目，著者名，公刊の方法及び時期を順に明記すること。
- 3 参考文献は，博士論文の場合に記載すること。



論文内容要旨

報告番号	甲 工 乙 工 工 修	第 119 号	氏 名	野 口 真 児
学位論文題目		ファジィ推論を用いた高所作業車のモデリングと制御に関する研究		
<p>内容要旨</p> <p>わが国は国際的競争時代を迎え、バブル崩壊後の影響が残るなかで少子化・高齢化社会への備えを迫られている。そのため、マクロ的に経済全体の生産性を押し上げる効果を持つ良質な社会資本のストックが必要であり、これに建設業が担う役割は大きい。しかしながら、労働力の高齢化と不足は深刻であり、労働死亡災害の約4割を占める危険な業種でもある建設業において、生産性を向上させ施工の合理化、安全確保を図ることが大きな課題である。</p> <p>これらの問題への解決策として、工事の機械化に大きな期待が寄せられているものの、厳しい自然環境下で強い非線形性を有する油圧アクチュエータを用いた建設機械の操作はオペレータに大きな負担を強いる。また、空間的作業を行うため複数の駆動軸を有する建設機械において、効率よい作業を行うためには複数の駆動軸を同時に協調して動作させねばならず、オペレータには各軸の非線形性を補う操作に加えて軸間の干渉を補償し多軸を協調して動作させることが要求され、操作はより一層熟練を要するものである。従って、油圧アクチュエータの非線形性を十分抑圧し、オペレータの指令に遅れなく追従するサーボシステムおよび軸間の干渉を抑制した協調制御システムを構成しなければならない。</p> <p>本論文では、以上の点を考慮して対象の線形性を前提としないファジィ推論を利用し、建設機械の実用を前提とした制御手法およびモデリング手法について述べている。以下に本論文の構成と概要を述べる。</p> <p>まず、第2章では、本研究で用いた伸縮ブーム型高所作業車の構造、実測システムおよび油圧器機や機構上の特性、駆動軸間の干渉といった高所作業車の持つ特性について述べる。</p> <p>第3章では、非線形性の強い油圧サーボシステムの追従特性を改善するために、制御ルールを自動的に調整する自己調整ファジィコントローラ(STFC)について検討している。ファジィ制御を適用するにあたって、実機への実装を前提として、計算量の削減や必要なメモリ量を低減させる制御ルール数低減化法を提案している。これを高所作業車に適用した場合の実測結果から提案したシステムの有用性を確認している。</p> <p>第4章では、油圧駆動される多軸の協調制御問題について検討している。一般に産業界で用いられる多軸駆動システムでは、個々の駆動軸の制御精度より各軸の出力がある関係を満足しつつ共通の目標を達成する協調化精度を重要視する場合が多い。こうした問題に対し、追従特性の改善のために前章で提案したSTFCを各軸コントローラとして、また、協調化特性の改善のために軸間の相互干渉を抑制する1)非干渉化制御システムおよび2)幾何学的モデルに基づく協調制御システムを提案し、高所作業車の作業台の水平・垂直移動に適用した場合の実測結果から同システムの有用性を確認している。</p> <p>第5章では、強い非線形性を有する油圧アクチュエータにより駆動される複数の駆動軸と複雑な機械構造から構成される建設機械の制御コントローラを効率よく設計するために必要なモデルの実用的導出手法について検討している。パラメトリックなシミュレーションを要する物理モデルに対し、本研究では入出力信号の実測結果からファジィモデルを構築する実用的なモデル構築手法を提案しており、油圧器機の非線形性および機械の姿勢変化に伴う動特性のパラメータ変動を、自己調整ファジィ推論と特徴的な機械姿勢における線形近似モデルを用いてモデル化している。本手法により高所作業車のモデリングを行い、実測結果に基づく実用的モデリング手法であることを確認している。</p> <p>第6章では、総括として本研究の成果について述べている。</p>				



ファジィ推論を用いた高所作業車の  
モデリングと制御に関する研究

1998年3月

野口 真 児



ファジィ推論を用いた高所作業車の  
モデリングと制御に関する研究

1998年3月

野口 真児



## 目次

第1章 緒言 .....	1
第2章 高所作業車 .....	6
2.1 まえがき .....	6
2.2 構造および諸元 .....	7
2.3 計測システム .....	12
2.4 基本特性 .....	13
第3章 ファジィ制御を用いた単軸位置制御システム .....	20
3.1 まえがき .....	20
3.2 ファジィ制御 .....	23
3.2.1 ファジィ推論 .....	24
3.2.2 逆モデルの獲得 .....	25
3.2.3 オートチューニングのための学習アルゴリズム .....	25
3.3 システム構成 .....	27
3.4 自己調整ファジィフィードフォワードコントローラ .....	29
3.4.1 クロス方式STFC .....	29
3.4.2 ルール数低減化 .....	31
3.4.2.1 リング方式 .....	31
3.4.2.2 セパレート方式 .....	31
3.4.3 速度ファジィコントローラ .....	33
3.5 実測結果 .....	35
3.6 まとめ .....	48
第4章 ファジィ制御を用いた多軸協調制御システム .....	50
4.1 まえがき .....	50
4.2 非干渉化制御システム .....	52



4.2.1	制御システム .....	52
4.2.2	非干渉化ファジィコントローラ .....	52
4.2.3	自己調整ファジィコントローラ .....	54
4.2.4	実測結果 .....	55
4.3	モデルに基づく協調制御システム .....	60
4.3.1	協調動作モデル .....	60
4.3.2	制御システム .....	62
4.3.3	協調動作コントローラ .....	63
4.3.4	自己調整ファジィコントローラ .....	64
4.3.5	実測結果 .....	65
4.4	まとめ .....	70
第5章 ファジィモデリング .....		71
5.1	まえがき .....	71
5.2	線形近似モデル .....	72
5.3	ファジィモデル .....	77
5.3.1	システム構成 .....	77
5.3.2	推論アルゴリズム .....	78
5.4	実測結果 .....	80
5.4.1	チューニング結果 .....	81
5.4.2	モデリング結果 .....	84
5.5	まとめ .....	87
第6章 結 言 .....		88
参考文献 .....		91
論文記録 .....		107

## 第1章

### 緒 言

わが国は国際的な大競争時代を迎え、国内ではバブル崩壊後の影響が残るなかで少子化・高齢化社会への備えを迫られている。高齢化の進展に伴って、社会活力の鈍化が予測されることから、その到来の前に、マクロ的に経済全体の生産性を押し上げる効果を持つ良質な社会資本のストックが必要であり、そのために建設業が担う役割は大きい。

建設業は、わが国だけをみても就業人口が670万人であり、全就業人口の10%を占める巨大産業である<sup>1)</sup>。総務庁によれば、少子化・高齢化の進むなかで生産年齢人口は、1990年の69.5%をピークに減少の一途をたどり2020年に59.5%となり、高齢人口は逆に加速度的に増加し1996年の15.1%から2020年には26.9%となることが予測されている<sup>2)</sup>。現在、建設労務の需給関係は雇用者側にとって緩和状態であるものの、長期的には建設労働力の高齢化と不足は深刻であり、建設の生産性を向上させ施工の合理化を図ることが大きな課題である。こうした社会情勢のもとで建設業においても女性労働者の活用は、多様なニーズに対応できる労働力や質の高い労働力を確保するため、今後一層その必要性が高まっていくと考えられる。しかしながら、女子の有業率は1977年より上昇傾向にあるものの、従業者数の男女別構成比を産業大分類別にみると建設業では、女子の割合は27.8%（1996年）であり全産業41.0%を大きく下回っている<sup>3,4)</sup>。この女性労働者を活用するため、建設業は女性労働者にとっても十分魅力があり能力を発揮できる環境を整えねばならない。一方、労働災害の面から建設業を見れば、死傷災害の27.6%を占め、死亡災害においては42.4%にも達する危険な業種でもある<sup>5)</sup>。

これらの問題への解決策として、ロボットを含め建設機械による工事の機械化に大きな期待が寄せられている。しかしながら、これら建設機械の使用により新たな災害が発生していることも事実である。したがって、土木・建設工事の機械化は、省人化・省力化、工期短縮、作業環境の改善をねらいとして進められ、さらに品質・精度への要求が高度化・多様化するなかで熟練工不足や技能の低下といった状況下



において高品質を確保し施工精度の安定化を図り、また危険作業・苦渋労働から労働者を解放して建設業を安全で魅力ある産業とするものでなければならない。

こうした建設機械は一般に大型で重負荷で使用され、また粉塵や風雨を伴う厳しい環境下で用いられるため、アクチュエータには小型高出力が可能な油圧アクチュエータが用いられている<sup>6-9)</sup>。しかしながら、その特性は制御弁の不感帯や片ロッドシリンダの非対称性、さらに機械系の持つガタやバックラッシュおよび摩擦などにより、強い非線形性を有している<sup>10-11)</sup>。また、建設機械は屋外の厳しい自然環境下で用いられることが多く、複雑な操作はオペレータにより大きな負担を強いることとなる。更に、熟練オペレータ不足による未習熟オペレータの増加や女性オペレータの進出が社会情勢として定着している現在、建設機械の性能および安全性の向上に加えて自動化、高機能化、操作の簡略化が必要不可欠となっている。特に、オペレータが車輦上のキャブ内またはラジオコントロール等のリモートコントロールを利用して車輦外から操作可能なクレーンやパワーショベルなどの他の建設機械とは異なり、高所での足場を提供する高所作業車ではオペレータが作業機に取り付けられた作業台上で操作また建設作業を行う。したがって、高所作業車では作業機自体がオペレータにとって作業環境となるため、操作性の向上が作業環境の改善に直結する。これらの要求を実現するためには、油圧アクチュエータの非線形性を十分抑圧し、オペレータの指令に遅れなく追従するサーボシステムを構成しなければならない。

また、建設機械は非線形性の強い油圧アクチュエータにより駆動されるとともに、空間的作業範囲を確保するために複数の駆動軸を有する。効率よい作業を行うためには複数の駆動軸を同時に協調して動作させることが必要であり、オペレータには駆動軸の非線形性を補う操作に加えて多軸を協調して動作させるという複合操作が要求される。さらに、複合動作を行った際には駆動軸間の相互干渉という問題も発生し、操作はより一層熟練を要するものである。

本論文では、以上の点を考慮し、高所作業車の実用化を前提とした制御システムおよび制御コントローラを効率よく設計するためのモデリングシステムについて述べている。コントローラおよびモデリングは、ともに対象の線形性を前提とせず、

“あいまいさ”の効用を認め、“あいまいさ”を積極的に扱うファジィ推論を利用する<sup>12-18)</sup>。ファジィシステムは本質的に非線形なシステムであり、強い非線形特性を有する建設機械の制御やモデリング手法として期待できる<sup>19-23)</sup>。しかしながら、その制御結果やモデリング結果の良否は設定されたルール、メンバシップ関数や入出力ゲインに依存するため、設計者は適切なルールの設定にしばしば多大な時間を費やすこととなる<sup>24-31)</sup>。そこで、調整パラメータのセルフチューニング機能を有する自己調整ファジィ推論を用い、さらに、実用的手法とするためにルール数を低減したファジィ制御器や入出力信号の実測結果に基づくファジィモデリングシステムを提案する。以下に本論文の構成と概要を述べる。

まず、第2章では、本研究で用いた伸縮ブーム型高所作業車の構造、実測システムおよび油圧アクチュエータを制御する流量制御弁や機構上の特性、駆動軸間の相互干渉といった高所作業車の持つ特性について述べる。

第3章では、物理法則に基づいた数学モデルの導出が困難であり非線形性の強い油圧サーボシステムの追従特性を改善するために、制御ルールの後件部をシングルトンの変数とし追従誤差を零収束させるよう自動的に調整する自己調整ファジィコントローラ (Self-Tuning Fuzzy Controller)<sup>32)</sup>について検討している。ファジィ制御を適用するにあたって、コントローラの入出力ゲインやファジィ制御規則をいかに合理的に最適調整するかという実用上の問題点が挙げられている。近年、時間を要する制御則の調整を自動的に行わせる自己調整器に関し、種々の方法が提案されている。これまで提案された学習アルゴリズムは、反復パラメータ調整と実時間パラメータ調整を併用する方法<sup>33,34)</sup>、ニューラルネットワークによる方法<sup>35-45)</sup>、遺伝的アルゴリズムによる方法<sup>46-55)</sup>、勾配法による方法<sup>56,57)</sup>などがある。STFCでは、勾配法の1つである誤差表面に関する最急降下法を学習則に用いた簡略化型推論法を採用している<sup>58,59)</sup>。STFCはフィードフォワードコントローラとして用いられ、従来の固定ゲインフィードバックコントローラに付加した二自由度制御システムである。ここでは、制御コントローラの組み込み機器への実装を前提とし、さらなる計算量の削減や必要なメモリ量を低減させCPUへの負担を軽減することを目的とし



て、制御ルール数低減化法を提案している。従来の方法は入力信号の全ての組み合わせを考えた制御ルールである（以下、これをクロス方式と記述する）ため、詳細なルールを記述すればするほど後件部変数は増大する。そこで、予め入力信号を2組のペアとして制御ルールを構成するリング方式に加え、入力信号毎にそれぞれ独立した制御ルールを設定するセパレート方式を比較検討している。本章では、提案した油圧サーボシステムの構成および制御アルゴリズムについて詳述し、高所作業車のブーム伸縮軸に適用した場合の実測結果から提案したファジィルール低減化法の有用性を確認している。

第4章では、油圧サーボアクチュエータにより駆動される多軸の協調制御問題について検討している。一般に複数の駆動軸から構成される多軸駆動システムでは、個々の駆動軸の制御精度より各駆動軸間の同期化精度を重要視する場合が多く、さらに産業界での実際面ではロボットマニピュレータに代表されるように、同一入力に対し同一出力が求められる同期化よりも異なる入力により各駆動軸の出力がある関係を満足しつつ共通の目標を達成する協調化が要求されることが多々ある<sup>60-61)</sup>。こうした問題に対し、試行の繰り返しによる学習制御によって解決を図る方法<sup>62)</sup>、適応制御による方法<sup>63-65)</sup>、ロバスト制御を実現する有効な手法として近年注目されている $H^\infty$ ループ整形法に基づいた方法<sup>66)</sup>などが提案されている。本研究では、追従特性の改善のために前章で提案したセパレート方式STFCを各軸コントローラとして、また、協調化特性の改善のために1) 駆動軸間の相互干渉を抑制することを目的とした非干渉化制御システム、2) 幾何学的な協調動作モデルに基づく協調制御システムを提案している。両システムともに、お互いの動特性や目標値が異なる駆動軸どうしが譲り合い調和して共通の目標である協調関係を実現させるものである。多軸の協調制御として高所作業車の作業台の垂直・水平移動に適用した場合の応答特性の実測結果から、同システムの有用性を確認している。

第5章では、強い非線形性を有する油圧アクチュエータにより駆動される複数の駆動軸と複雑な機械構造から構成される建設機械に対し、コントローラを効率よく設計するために必要なモデルの実用的導出手法について検討している。最近では、

このモデル作りを支援するシミュレーションツールの技術が進み、年々計算能力の向上著しいコンピュータとGUI(Graphical User Interface) 技術の普及により、モデル構築が容易に、また効率よく行われるようになりつつある<sup>67)</sup>。こうした背景のもとで、油圧システムについても物理法則に基づいた数学モデルの導出が検討されているものの<sup>68)</sup>、管路の非定常粘性を考慮した分布定数系と要素器機の集中定数系モデルとの整合性をとること、システムの持つ非線形性やパラメータ変動のために設計者は何度もシミュレーションを繰り返し現実との差を縮め不具合を修正しているのが現実である。そこで、本研究ではモデリング対象をブラックボックスとし、入出力信号の実測結果のみからファジィモデルを構築する実用的なモデル構築手法を提案する。

提案するモデリング手法は、第3章で述べた推論ルールの後件部を自動調整する自己調整ファジィ推論を用いており、推論値と実測値の誤差信号を零収束するように後件部変数を予め調整し、油圧アクチュエータの非線形性をモデル化する。機械の姿勢変化に伴う動特性のパラメータ変動には、特徴的な機械姿勢における線形近似モデルを利用することでモデル化している。本手法により高所作業車のブーム伸縮軸、起伏軸についてモデリングを行った結果、提案した手法は各軸の非線形性および姿勢変化に伴う動特性の変化を考慮した実用的モデリング手法であることを確認している。

第6章では、建設機械を自動化、高機能化、操作の簡略化をし、'人にやさしい機械'とする制御システムおよびこれらのコントローラの効率よい設計のためのモデリングシステムについて総括する。



## 第2章

### 高所作業車

#### 2.1 まえがき

きつい、汚い、危険の3K現場といわれる建設現場において、建設機械は工事の省力化、効率化、また作業の安全のために用いられる。この建設機械のうち高所作業車は、高所での作業を行うため人の足場を提供するものであり、パワーショベル、ブルドーザ、クレーン等の他の建設機械と異なり作業機自身が作業を行うことはない。換言すれば、作業機自身が操作するオペレータの作業環境となるため、より一層の安全を確保しなければならない。よく似た構造を持つ移動式クレーンは、ブーム伸縮・ブーム起伏・ブーム旋回・ウインチといった4つの駆動軸を持ち、ワイヤーロープにより吊り下げられた荷物が振れることなく作業を行うには高度な操作技術を必要とする。一方、高所作業車は広く普及している伸縮ブーム型でブーム伸縮・ブーム起伏・ブーム旋回・作業台旋回の4つの駆動軸を有するものの、小さな作業台では作業台旋回動作の移動量は少なく主に他の3軸で作業台の移動がなされること、またウインチ機能を持たないことによりクレーンほどの高度な操作技術を必要としない<sup>69)</sup>。しかしながら、近年、人だけでなく資材も同時に作業場へ運びたいという要求により作業台が大型化し、これに伴い作業台旋回動作が重要になってきたため、操作は複雑化してきている。さらに、高所作業車はその作業の性格上、クレーンなどのように専属のオペレータを持たない場合もあり、最近ではレンタルリースでの利用が増加し、その傾向は強まってきていることから不特定多数の人による利用が前提となってきた。

こうした状況下にある高所作業車では、オペレータの負担を軽減する自動化・高機能化・操作の簡略化を目的とする開発が進められている。しかしながら、高所作業車は屋内外で用いられる大型の建設機械であるため、厳しい自然環境のもとで大出力を発生しなければならない。このため、各駆動軸には従来通り油圧アクチュエータが用いられている。建設機械から油圧をみれば、以下のような建設機械が要求する多くの特徴を備えている。

- ①大きなトルク・慣性比
- ②高速応答
- ③小さな操作力で大動力を制御可能
- ④作動速度の無段変速が容易
- ⑤作動中に速度と方向が容易に変化可能
- ⑥管路またはホース1本で動力の伝達と分配が可能
- ⑦高圧化によるシステムの小型化
- ⑧器機の構造が堅牢で作動が簡潔

しかしながら、この油圧アクチュエータを構成する油圧機器は、制御弁流量特性の不感帯や片ロッドシリンダの非対称性、さらに機械系の持つガタやバックラッシュおよび摩擦などにより非常に強い非線形性を有しており、複雑な機械構造と相まって操作を難しくしている。

本研究においては、油圧器機の持つ非線形性を十分抑止した高精度な油圧サーボシステムをもとに高機能な高所作業車やそのコントローラ設計に欠かせない高所作業車のモデリングについての実用的手法を検討している。本章では、本研究に用いた伸縮ブーム型高所作業車の構造、実測システムおよびその特性について述べる。

#### 2.2 構造および諸元

本研究に用いた作業床最大高さが12.5[m]の伸縮ブーム型高所作業車(タダノ製AC-125S)の主要諸元を表2.1に外観を図2.1に示す<sup>70)</sup>。伸縮ブーム型高所作業車は、台車、油圧発生装置、昇降装置、起伏装置、旋回装置、作業床自動水平装置、操作装置、安全装置および走行装置などから構成される。本機は、作業台を移動させるためにブーム伸縮軸・ブーム起伏軸・ブーム旋回軸・作業台旋回軸の4つの駆動軸を有し、つぎの4つの動作が可能である。

- 1) 伸縮シリンダによるブーム伸縮動作
- 2) 起伏シリンダによるブーム起伏動作
- 3) 旋回モータによるブーム旋回動作
- 4) 作業台旋回モータによる作業台旋回動作



表 2.1 供試高所作業車の主要諸元

maximum lifting hight		12.5 [m]
maximum working radius		8.2 [m]
maximum load on platform		800 [kg]
operating speed	boom telescoping	4.88[m]~10.76[m] / 27[sec]
	boom elevation	-5[deg]~70[deg] / 36[sec]
	boom slewing	0.8[rpm]
	deck swing	0.8[rpm]
machine size	total length	5.15 [m]
	total width	2.48 [m]
	total height	2.60 [m]

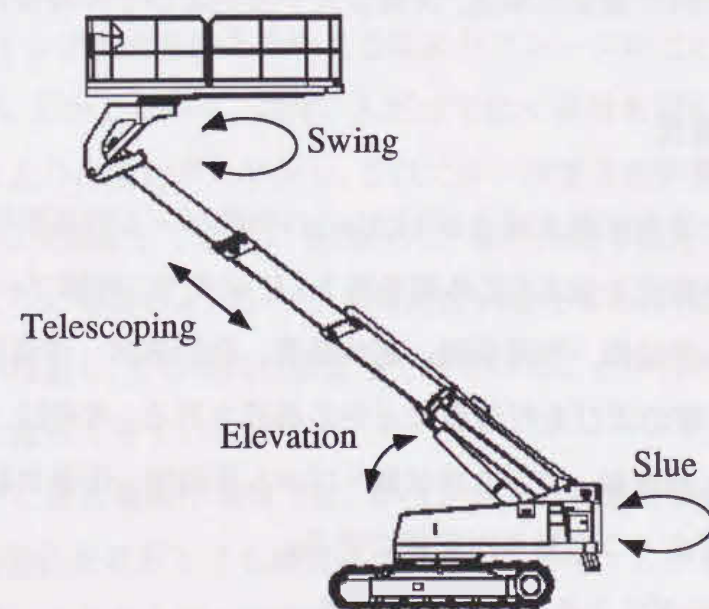


図 2.1 供試高所作業車の外観

各動作を行う油圧アクチュエータの油圧回路を図2.2に示す。各油圧アクチュエータを作動させるための圧油は、台車のエンジンまたは電動機により油圧ポンプを駆動して発生させる。ポンプから吐出された圧油は、リリーフ弁により調圧されたのち圧力補償付き電磁比例流量制御弁を介して油圧アクチュエータに送られ、油圧シリンダや油圧モータを駆動する。制御は電磁比例流量制御弁のスプール位置を操作することにより行われる。また、回路中には重力などの外力やホースの破損により、油圧シリンダや油圧モータが暴走することを防止するために、カウンタバランスバルブが備えられている。

なお、作業床からの転落を防止するために、ブーム起伏部と作業台支持部に各々油圧シリンダを幾何的に対称的に配置して、互いのシリンダの油圧を連結することにより、ブームの起伏角によらず作業床を自動的に車体に対し平衡に保持する作業床自動水平装置（レベリング機構）を有する。

作業機の操縦は、作業台上に設けられたデッキ部操作パネルまたは旋回台部に取り付けられた下部操作パネルを操作することにより行われ、通常オペレータは作業台上で作業を行いながら操作するため、おもに図2.3に示すデッキ部操作パネルを利用する。この操作パネルのうち、作業台の移動に関する部分のみを説明する。操作パネル上には4本のジョイスティックレバーが備えられ、ブーム伸縮・ブーム起伏・ブーム旋回・作業台旋回のそれぞれに対応している。また、この機種には図2.4に示す作業台の水平・垂直移動という複合動作が自動化されており、ブーム伸縮用、ブーム起伏用、ブーム旋回用の各ジョイスティックレバーは、伸縮軸・起伏軸の同時駆動による垂直移動、同じく伸縮軸・起伏軸の同時駆動によるブーム軸方向への水平移動、伸縮軸・起伏軸・旋回軸の同時駆動による旋回方向への水平移動それぞれとを兼ねている。兼用したジョイスティックレバーは、スイッチにより各駆動軸の個別操作と自動化した複合操作とを切り換えている<sup>7)</sup>。



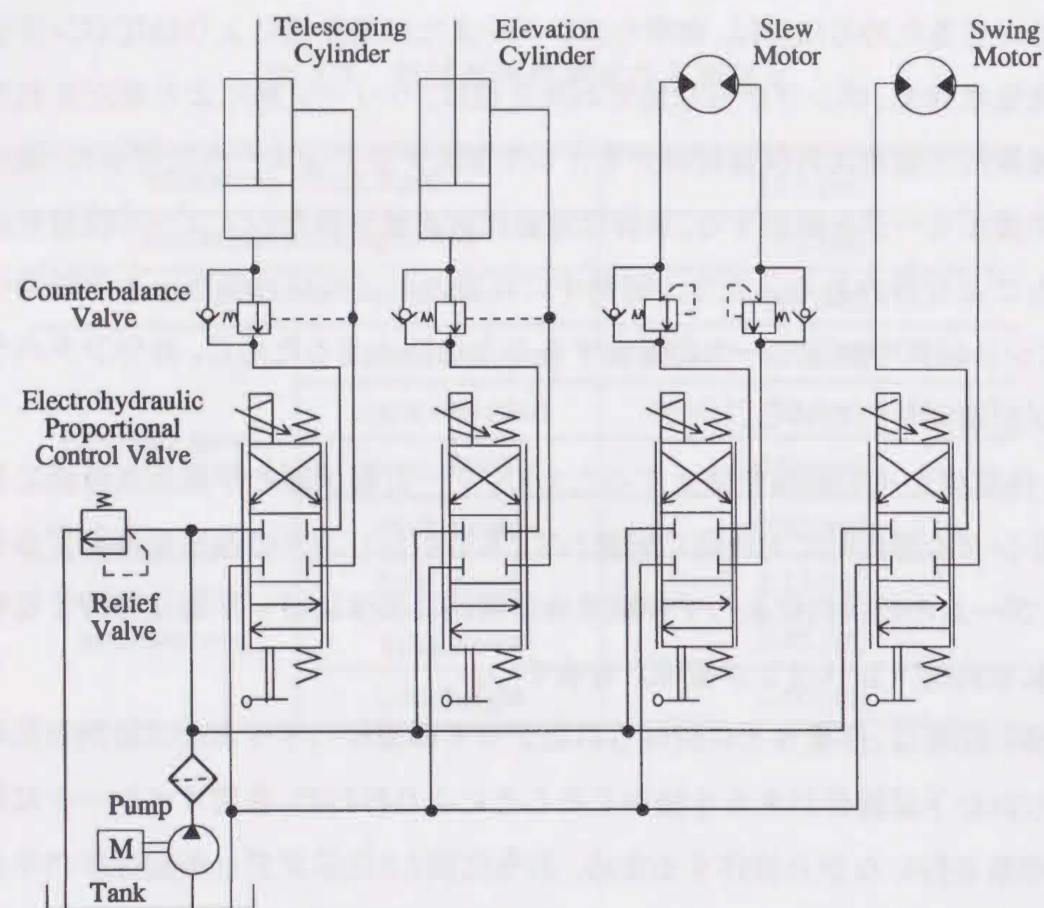


図 2.2 油圧回路

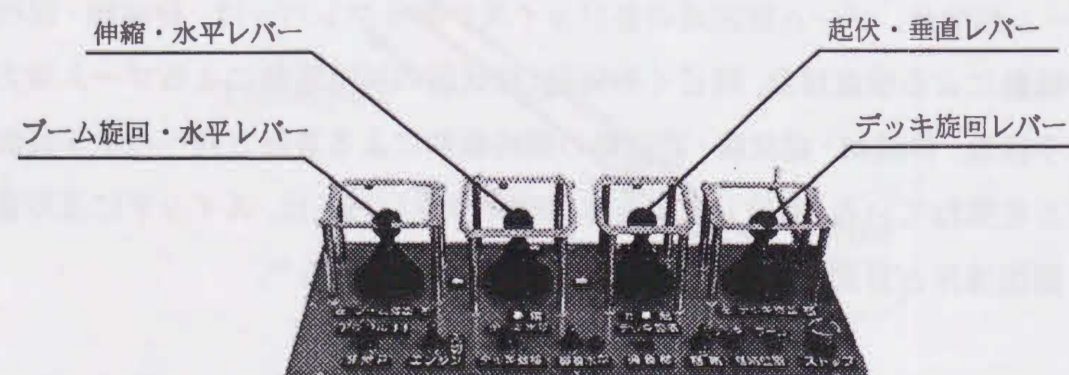


図 2.3 デッキ部操作パネル

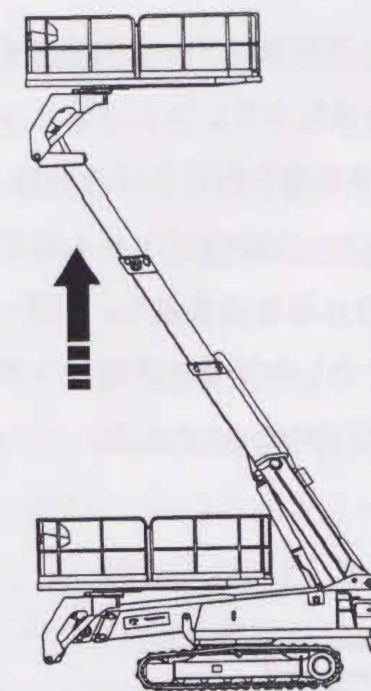


図 2.4(a) 作業台垂直移動の模式図

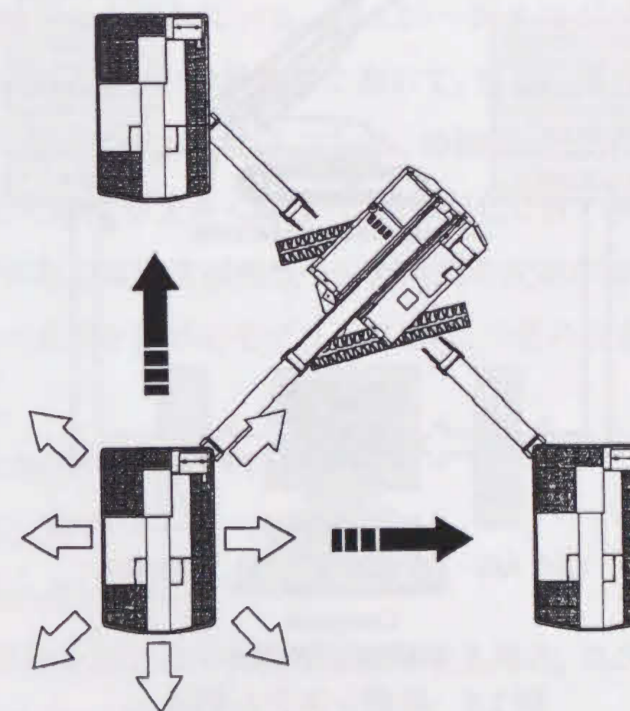


図 2.4(b) 作業台水平移動の模式図



### 2.3 計測システム

計測システムの構成を図2.5に示す。ブーム伸縮長さ・ブーム起伏角度・ブーム旋回角度・作業台旋回角度の各軸出力やジョイスティックレバーストロークの検出のために各々ポテンシオメータが取り付けられている。検出された各軸位置出力とジョイスティックレバーストロークは12ビットA/D変換器を介し、計測・制御用計算機(CPU80486+NDP80487)に取り込まれる。計測・制御用計算機で算出された出力は12ビットD/A変換器を介し各流量制御弁アンプへ出力される。なお、サンプリング周期は実装を考慮して25[msec]とした。

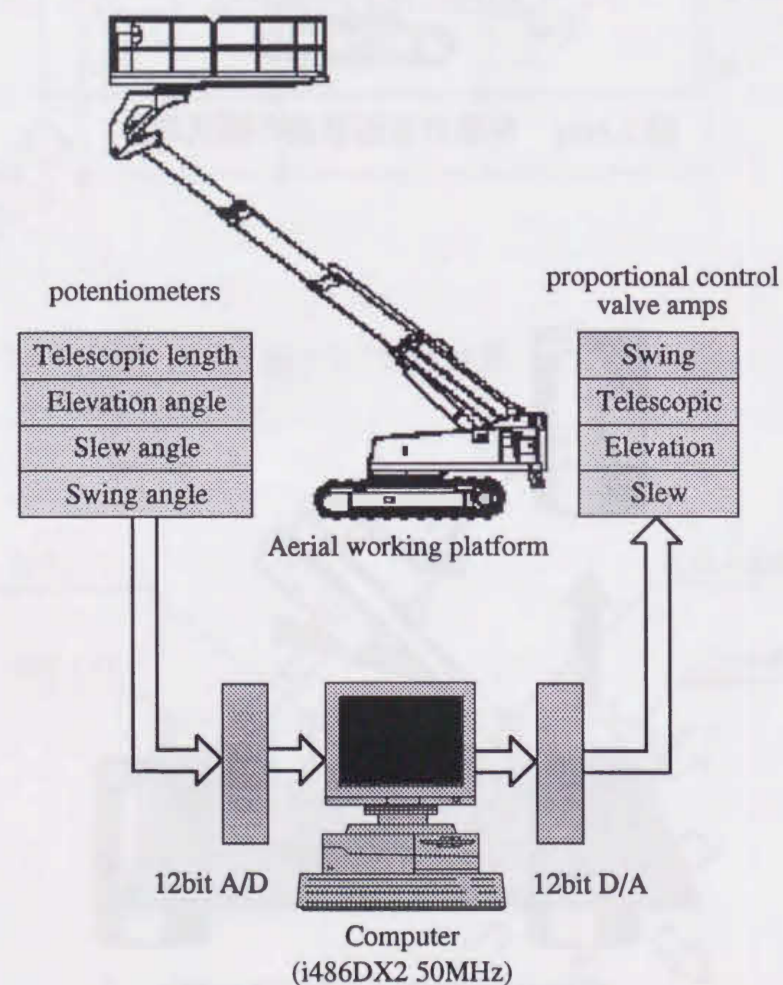


図2.5 計測システム構成

### 2.4 基本特性

システムは油圧機器や機械の機構に起因する非線形性と機械の姿勢変化に伴うパラメータ変動など、その特性は非線形性の強いものである。油圧機器の持つ非線形特性を表す一例として電磁比例流量制御弁の流量特性を図2.6に示す。また、起伏角に対する起伏シリンダ速度  $V_{cyl}$  [cm/s] と起伏角速度  $\omega$  [deg/s] の比を図2.7に示す。図2.6より制御弁は不感帯特性や弁の開閉に依存するヒステリシス特性を有していることがわかる。また、図2.7は機械的構造に起因して、起伏軸シリンダを一定の速度で動作させても起伏角度により起伏角速度が変動することを示している。また、重力の影響を受け、機械の姿勢変化に伴うパラメータ変動を表す定常特性を図2.8、図2.9に、過渡特性を図2.10～図2.13に示す。図2.8はブーム角度を固定して伸縮軸のみに制御弁をフルオープンさせる正弦波信号を入力した場合の伸縮動作を、図2.9はブーム長さを固定して起伏軸のみに制御弁をフルオープンさせる正弦波信号を入力した場合の起伏動作を示す。図2.8、図2.9より前述の制御弁流量特性の不感帯やブームの摩擦等によるスティックスリップ、あるいは片ロッドシリンダの非対称性に起因する応答の違いなどシステムが持つ非線形特性の影響や機械姿勢の違いによる特性変動が現れている。図2.10～図2.13はブーム長の長短、ブーム角度の高低で表される4つの機械姿勢において、各々の軸を単独に動作させた場合のステップ応答を動作方向別に示している。伸縮軸、起伏軸ともに動作方向により減衰、ゲインやむだ時間が大きく異なり、姿勢変化に伴い伸縮軸では縮み方向のゲイン変動が、起伏軸では固有振動数やむだ時間の変動が顕著である。

以上の特性を持つ高所作業車のモデリングには、つぎの点を考慮してモデル化しなければならない。

- ①油圧機器や機構部分がもつ非線形性
- ②重力による影響やパラメータ変動
- ③各駆動軸間の相互干渉

また、こうした特性を持つ高所作業車を制御する場合、コントローラは以下の点を考慮して設計しなければならない。



- ①非線形性の補償
- ②重力による影響やパラメータ変動に対するロバスト性
- ③各駆動軸間の非干渉化
- ④追従特性の改善

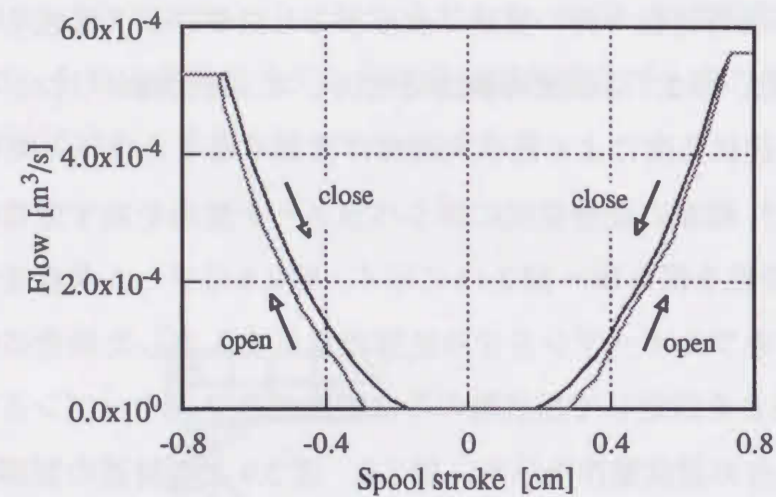


図 2.6 電磁比例流量制御弁の流量特性

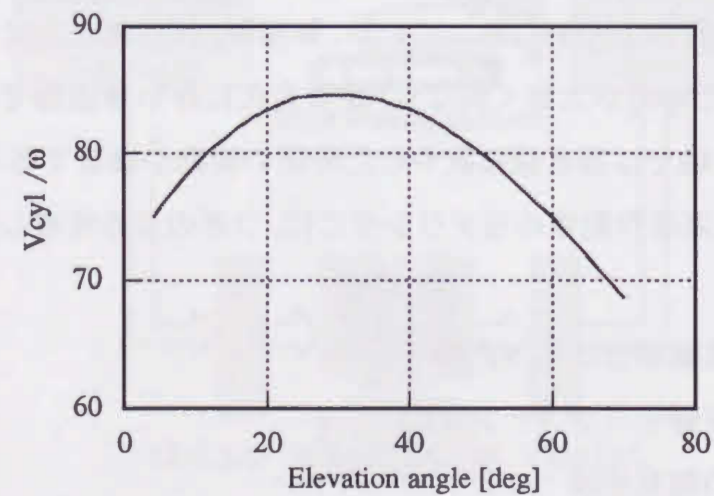


図 2.7 起伏角度－起伏シリンダ速度／起伏角速度

これらはいずれも高所作業車の操作性の改善に寄与するものであり、実現できれば我々の目指す“ひとにやさしい機械”に近づけるものである。

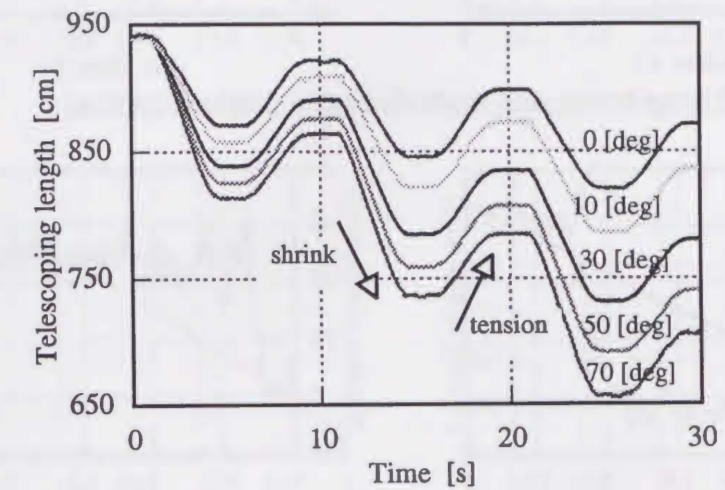


図 2.8 種々のブーム角における伸縮軸の定常特性

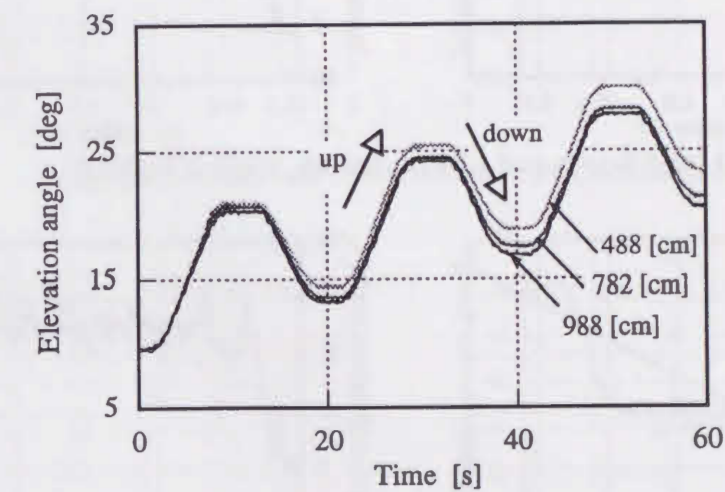
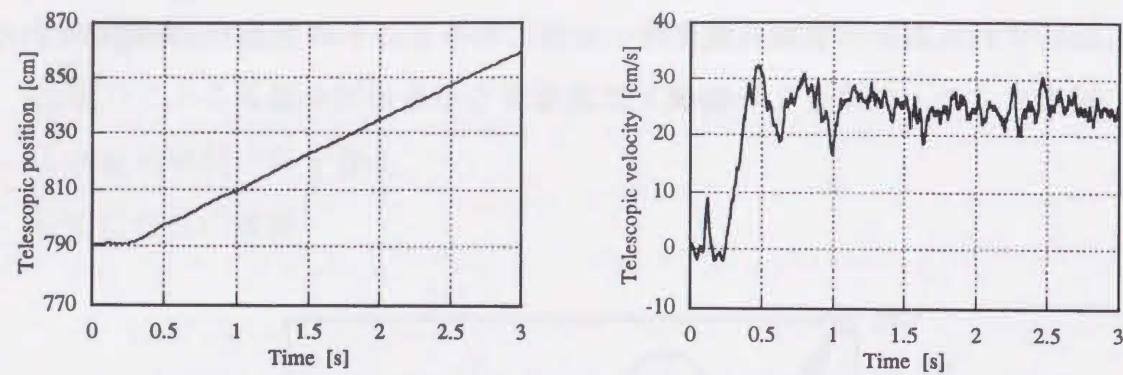
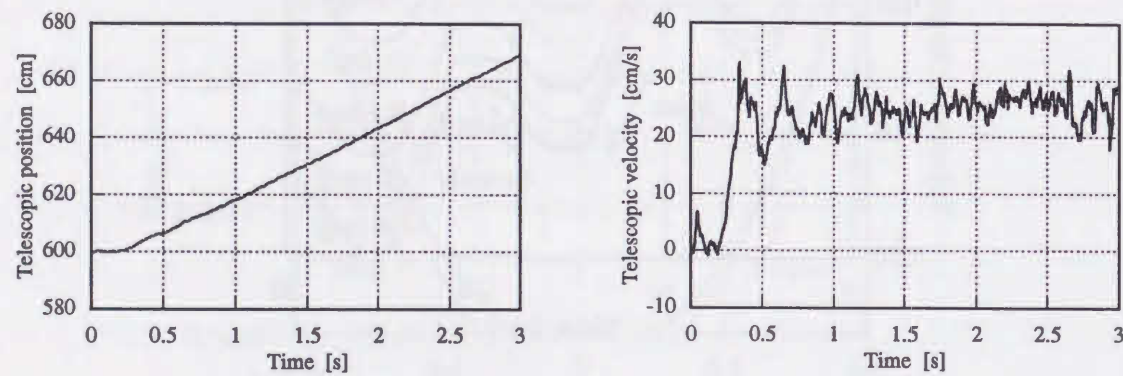


図 2.9 種々のブーム長さにおける起伏軸の定常特性

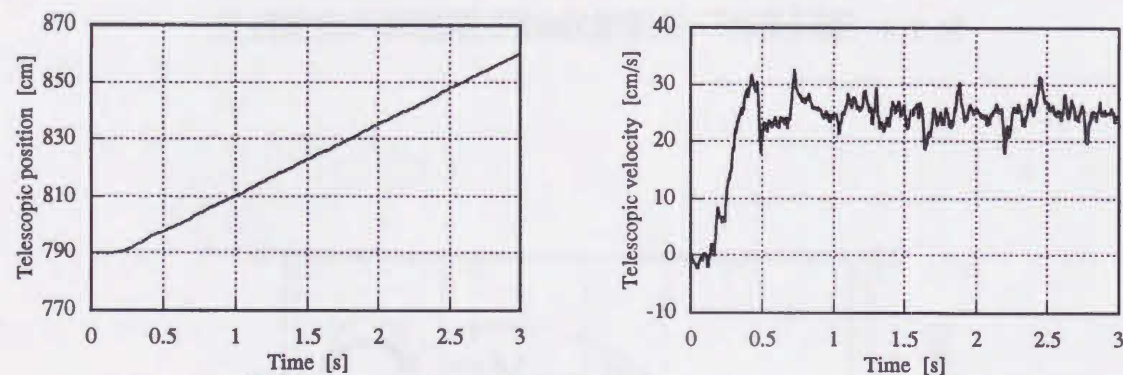




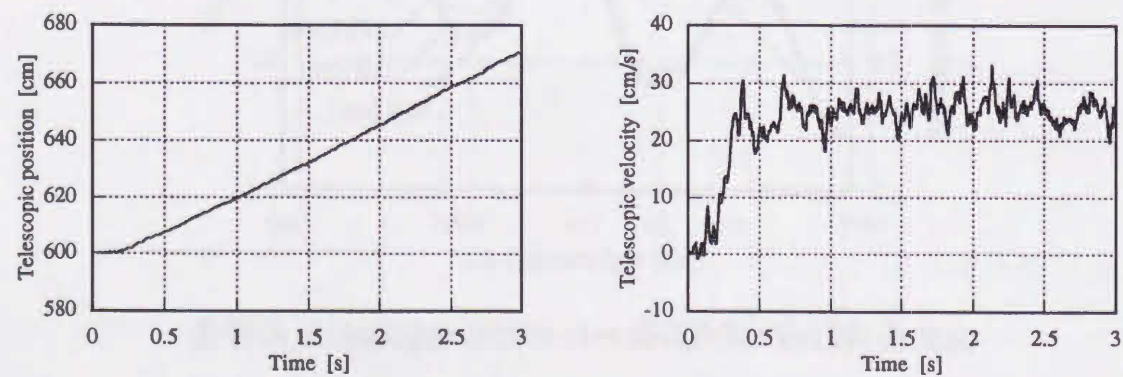
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation

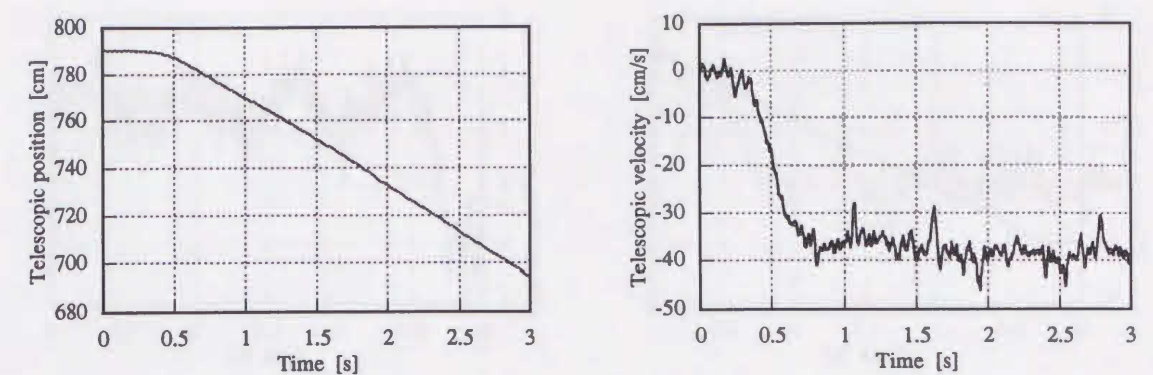


(c) long boom and low elevation angle situation

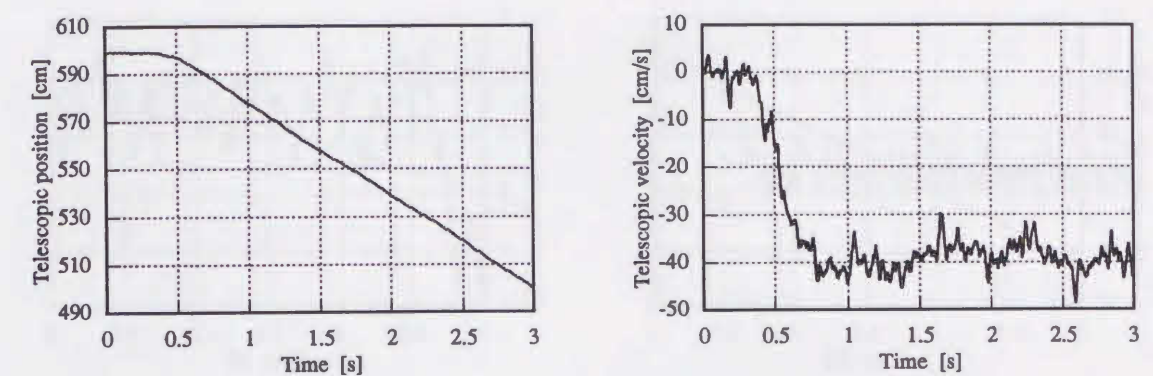


(d) short boom and low elevation angle situation

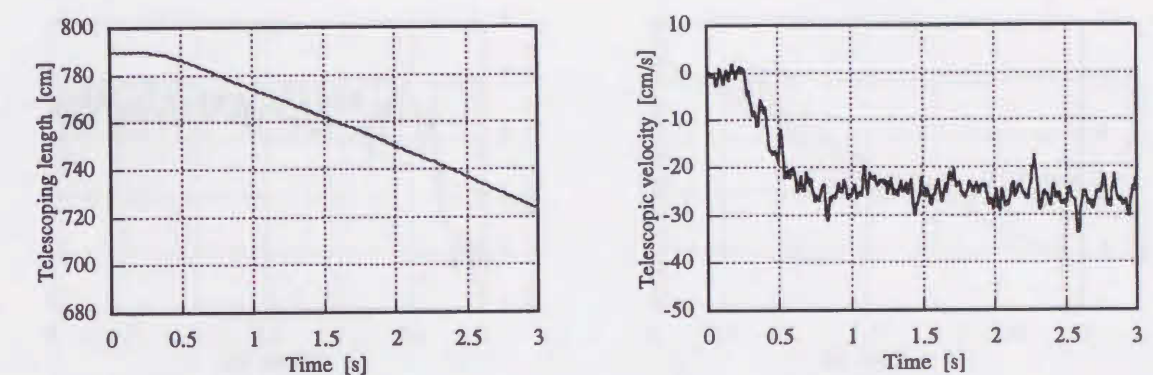
図 2.10 伸縮軸伸び方向過渡特性



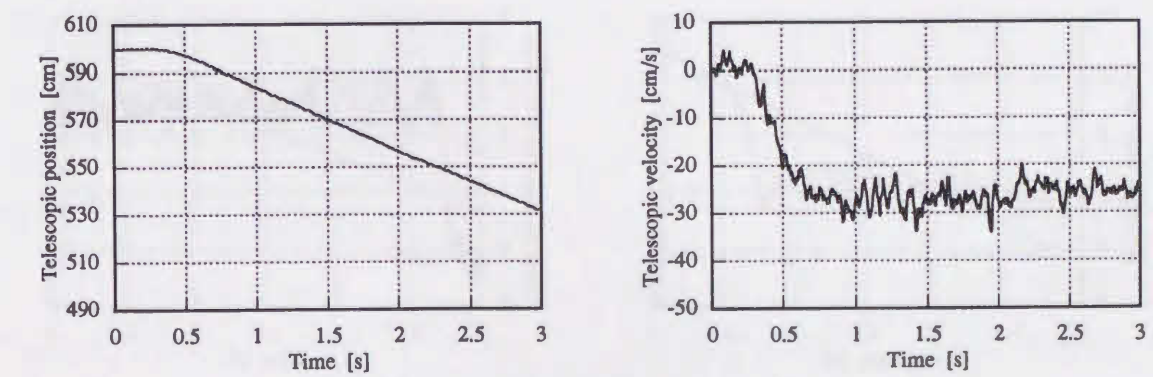
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation



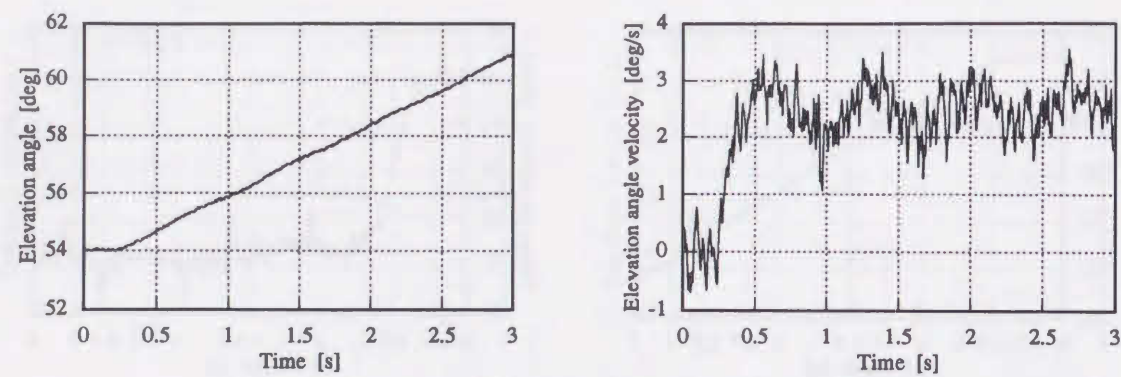
(c) long boom and low elevation angle situation



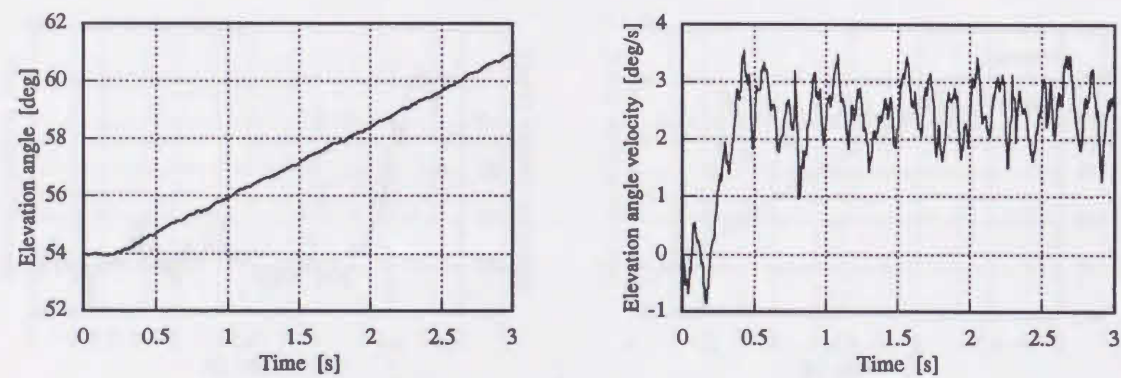
(d) short boom and low elevation angle situation

図 2.11 伸縮軸縮み方向過渡特性

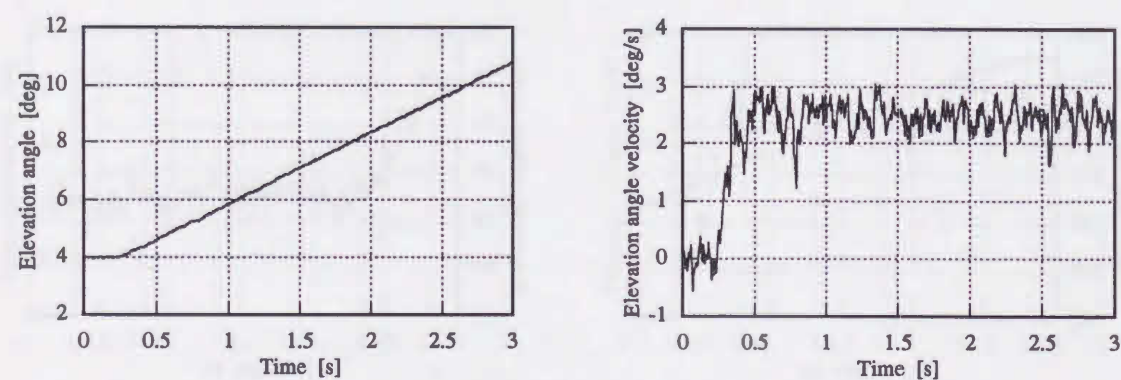




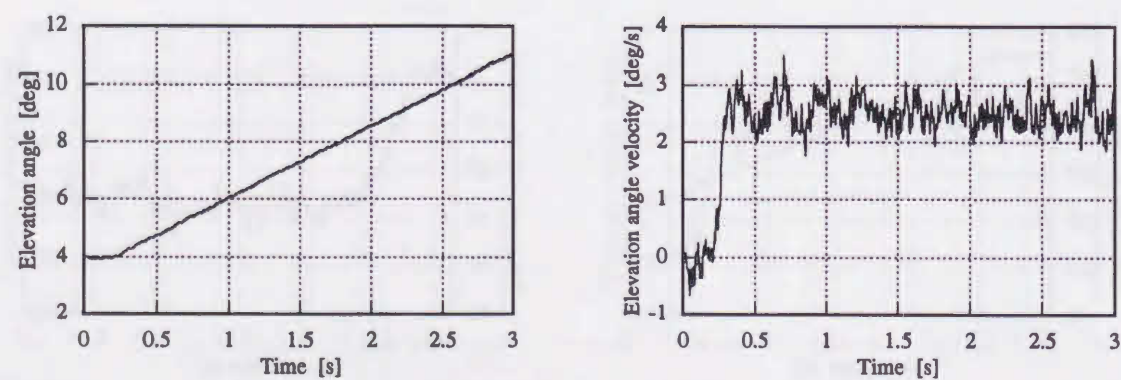
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation

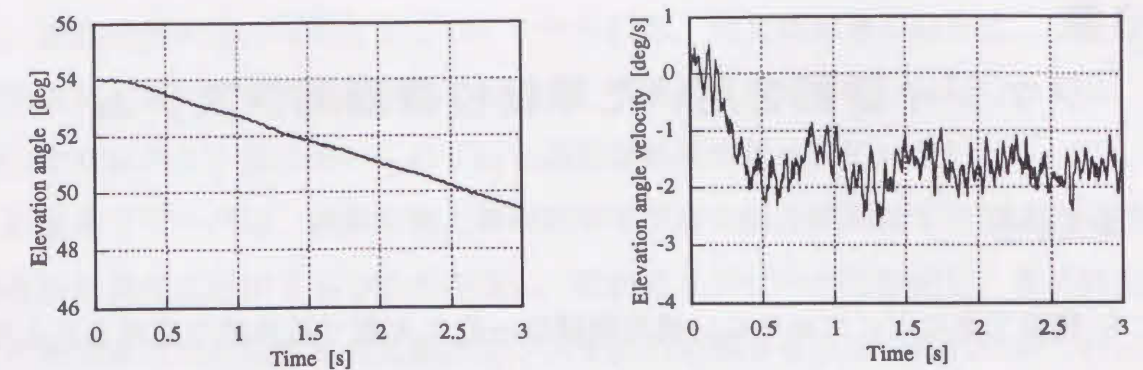


(c) long boom and low elevation angle situation

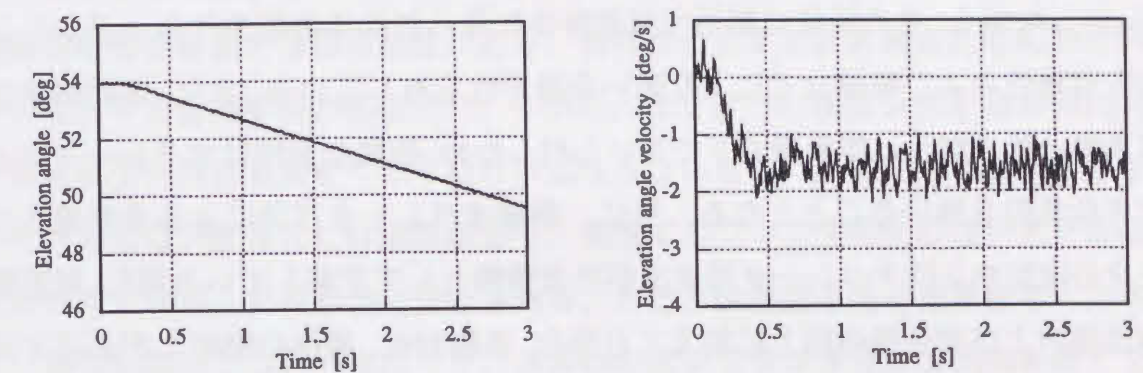


(d) short boom and low elevation angle situation

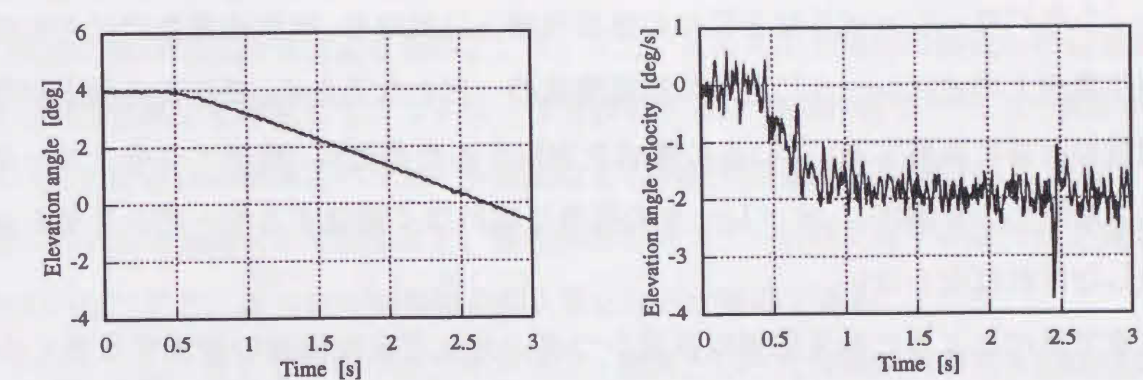
図 2.12 起伏軸起こし方向過渡特性



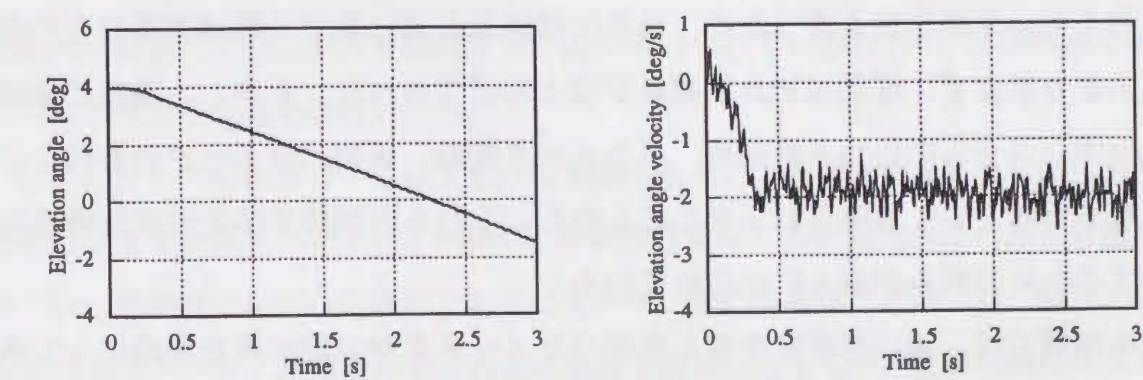
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation



(c) long boom and low elevation angle situation



(d) short boom and low elevation angle situation

図 2.13 起伏軸伏せ方向過渡特性



## 第3章

### ファジィ制御を用いた単軸位置制御システム

#### 3.1 まえがき

土木・建設工事などに欠かせない建設機械は一般に大型で重負荷で使用されるため、アクチュエータには小型高出力が可能な油圧アクチュエータが用いられている。しかしながら、その特性は制御弁流量特性に見られる不感帯や片ロッドシリンダの非対称性および摩擦などにより強い非線形性を有している。また、建設機械は通常風雨を伴う厳しい作業環境下で用いられるため、複雑な操作はオペレータにより大きな負担を強いることとなる。更に、熟練オペレータ不足による未習熟オペレータの増加や女性オペレータの進出が社会情勢として定着している現在、建設機械の性能および安全性の向上に加えて自動化、高機能化、操作の簡略化が必要不可欠となっている。特に、オペレータが車輦上のキャブ内または車輦外から操作するクレーンやパワーショベルなどの他の建設機械とは異なり、高所作業車ではそれ自体が作業台上のオペレータにとって作業環境の一部となるため、操作性の向上が作業環境の改善に直結する。これらの要求を実現するためには、油圧アクチュエータの非線形性を十分抑圧し、オペレータの指令に遅れなく追従するサーボシステムを構成しなければならない。

前章で述べたように油圧制御は高速かつ高出力など建設機械の要求する多くの特徴を備えているが、油圧制御系の基本的な構成要素である制御弁の不感帯に代表される強い非線形性を持つため、線形化状態方程式に基づく最適制御などの適用はあまり進まず、従来はPID制御系がほとんどであった。しかし、最近の制御理論が実システムの持つ非線形性、パラメータ変動、未知パラメータの存在などの克服を目的として展開されてきたことから、これらの制御手法を油圧制御系に適用するための試みが盛んに行われている。

適応制御では、強い非線形性を有し未知パラメータを持つ油圧系を単純化して適応制御系を構成し、システムに適応能力をもたせており<sup>72)-76)</sup>、制御器構造を単純化しより実用向きである単純適応制御の応用も進められている<sup>77)-79)</sup>。しかしなが

ら、適応制御理論が前提とするいくつかの仮定、例えば対象の線形性、プラント次数既知、最小位相性、無外乱を油圧サーボ機構が満足していないことから、制御性能やロバスト性において必ずしも良好な結果が得られていない。

外乱オブザーバは、制御対象と線形数学モデルの出力誤差はすべて入力信号に重畳した外乱に起因するものとみなし、これをオブザーバで推定し、その外乱を打ち消すような信号を入力に加えてシステムの応答をモデルの応答に近づけ、応答特性の改善を図るものである。外乱オブザーバによれば油圧制御系に特有の各種非線形性を補償できる可能性があり、制御器に要する計算量も比較的少ないことから多くの適用事例がある<sup>80)-87)</sup>。しかし、オブザーバ極はシステムの極に対してある程度絶対値を大きく取らなければならないものの、推定には近似微分を用いるため外乱抑圧特性には限界があり、使用するフィルタ時定数はシステムの極配置や高次特性、非線形性に左右される。また、検出器の高周波雑音を十分考慮して適切に設定しなければならず、経済性の面からサンプリング周期を短くできない場合に問題となる。

最近の数理的設計法によるものとして、システムの入出力関係の観点から伝達関数のモデル化誤差を考慮してコントローラを設計する $H^\infty$ 制御がある<sup>88)-89)</sup>。 $H^\infty$ 制御では、ロバスト安定性の確保にパラメータ変動などの誤差が定量的に評価されるものの、線形システムを前提としていること、慣性負荷を持つサーボ系に対する設計法が確立されていないこと、得られた制御器の低次数化などが課題である。

一方、ニューラルネットワークやファジィ推論といった知識制御からも油圧制御系への適用が試みられている。ニューラルネットワークでは、その学習能力に注目し制御器内に対象の逆システムを構成する手法が用いられているものの、因果関係が不透明でありあまり活発ではない<sup>90)-93)</sup>。

これに対して対象についての大まかな知識をもとに、制御則をif文などの言語的制御規則により表現するファジィ制御は、非線形性を有する制御対象にも適用可能であるといった特徴を利用して検討されている<sup>94)-96)</sup>。特に産業界においては、既存の制御方法の上にファジィ制御を付加し従来の資産を活用したものや、全体の構成を熟練者の制御方法に踏襲させ現場に馴染みやすくさせるなどの工夫をして実用化が進んでい



る<sup>97)-102)</sup>。

剛性が低く強い非線形性を有する油圧系では、サーボ系を組んだ場合、安定性の面からループゲインを大きくとることは難しく、低応答でかつ振動的にならざるを得なかった。その結果、十分な位置決め精度が得られないなどの問題があった<sup>103)</sup>。また、パラメータ変動が大きい場合、単なるフィードバック制御では十分な剛性と安定性を同時に確保することには限界がある。したがって、油圧制御の要は、系の未知パラメータを含んだ強い非線形性をいかに克服し、高剛性とするかという点にある。

ここで、建設機械への実用に必要な制御の要件を考えると、以下のような要求が挙げられる。

- ①非線形性に対する十分な補償能力
- ②パラメータ変動に対するロバスト安定性
- ③制御系の設計や制御パラメータの調整の容易さ
- ④制御系の見通しの良さ
- ⑤コストに影響を与えないサンプリング周波数や演算量

現時点でこれらの要求をすべて満たすものはないが、有力な候補としてはオブザーバ<sup>104)-105)</sup>とファジィ制御<sup>106)-113)</sup>といえる。このうちファジィ制御は、制御対象の厳密な数学モデルを必要とせず、対象についての大まかな知識をもとに制御則を「if ~ then ~」形式の言語的ルールにより操作量を決定するため、モデルの導出が困難な油圧サーボシステムにとっては大きな魅力があり、熟練オペレータの知識や経験を生かした制御も可能である。また、建設機械を操作する人間操作系はファジィ的であるから、その制御系へのファジィ制御の適用に期待が持てる。しかしながら、制御結果は作成したルールに依存するため、実機毎の動特性を考慮した適切な制御ルールの設定が必要である。そこで、本研究では制御ルールの自動調整機能を持つ自己調整ファジィコントローラ (Self-Tuning Fuzzy Controller) について検討している。STFCはフィードフォワードコントローラとして使用され、その制御ルールの後件部はシングルトンの変数として追従誤差信号を零収束させるよう自動的に調整される。しかし、制御ルール数は入力信号の

全ての組み合わせを考えているため (以下、これをクロス方式と記述する)、詳細なルールを記述すればするほど調整すべき後件部変数は飛躍的に増加する。このことは、無用な制御ルールが存在するばかりでなく大容量のメモリを必要とし、演算時間の制約からも実機への適用には問題がある。これを解決するために、STFCの制御ルール数低減化法として予め入力信号を2組のペアとして制御ルールを構成するリング方式が検討されてはいるものの、実用化においては未だ十分とは言えない。

そこで、本論文では、実用化を前提とし、さらなるSTFCの制御ルール数低減化法について検討している。制御ルールの低減化法として、入力信号毎にそれぞれ独立した制御ルールを設定するセパレート方式を提案し、従来のクロス方式、リング方式と比較検討している。また、STFCへの入力として追従誤差信号の持つ意味およびファジィ推論による非線形な速度フィードバックについて述べる。以下では、提案した油圧サーボシステムの構成および制御アルゴリズムについて詳述し、高所作業車のブーム伸縮に適用した場合の実測結果から提案した低減化法の有用性を確認している。

### 3.2 ファジィ制御

近年、ファジィネスと呼ばれる言葉の意味にまつわるような“あいまいさ”や、個人の主観により異なるような“あいまいさ”が認識されるようになった。1965年にUniversity of California(Berkeley)のZadehにより提案されたファジィ理論は、このファジィネスを取り扱うための理論である<sup>11)-17)</sup>。ファジィ理論ではこうした“あいまいさ”を自由に設定できるメンバシップ関数により表現している。ファジィ理論が制御を中心とする実用面で応用され、その有効性が実証されたのはQueen Mary & Westfield UniversityのMamdaniがスチームエンジンの制御に適用した1974年のことである<sup>114),115)</sup>。その後、1982年にデンマークのF. L. Smidth社のセメントキルンの製造にファジィ制御を実用している。以降、特に日本において重工業、自動車、家電などの分野で産業応用が活発に行われている<sup>116)</sup>。



### 3.2.1 ファジィ推論

ファジィ推論の手法は種々提案されているが、大きく直接法と間接法に分けられる<sup>117)</sup>。直接法は、与えられた命題の前件部と後件部の関係をファジィ関係で表現し、このファジィ関係と事実を与えるファジィ集合との合成により推論結果を与えるファジィ集合を得る方法である。間接法は、命題にファジィ論理が挿入された形のファジィ推論である。ファジィ論理とは命題の真理値として「かなり真」とか「やや偽」といったファジィ集合で表されるあいまいな値を扱う論理である。間接法は真理値空間を媒介するため、直接法に比べて推論機構が複雑になる。このためファジィ制御で最も多く利用されているのは Mamdani も用いた直接法である。しかしながら、Mamdani の推論方法は、推論過程において多くの計算を要するため推論に時間を要し、また規則数が増加することが指摘されている。この問題を解決する方法として、

①関数型推論法（高木・菅野の方法）<sup>117)</sup>

②簡略化推論法<sup>118)-122)</sup>

といった Mamdani の推論方法を改良した推論方法が提案されている。Mamdani の推論方法および関数型推論法、簡略化推論法での推論規則をそれぞれ (3.1) 式～(3.3) 式に示す。

if  $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$  then  $z$  is  $C$ . (3.1)

if  $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$  then  $z = ax + by + c$ . (3.2)

if  $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$  then  $z = c$ . (3.3)

ここで、 $x, y$  は前件部変数、 $z$  は後件部変数、 $A, B, C$  はファジィ集合である。後件部もファジィ集合で表される (3.1) 式の Mamdani の推論規則に対し、(3.2) 式の関数型推論法での規則は、後件部が線形の入出力関係式で記述されおり、高速推論を可能にした推論方法である。(3.3) 式の簡略化推論法では、さらにファジィ制御向きに後件部を簡略化した方法で、Mamdani の推論方法の後件部のファジィ集合をシングルトンに置き換えたもの、または後件部に線形関数を用いた関数型推論法の後件部線形式を定数項だけにしたものといえる。簡略化推論法は Mamdani の推論方法に比べて

①推論機構が簡単

②計算機上での推論時間が速い

③特殊な形状をもつファジィ集合を用いる以外に推論結果の差はない

④パラメータチューニングが容易

であることがわかっている<sup>123)</sup>。

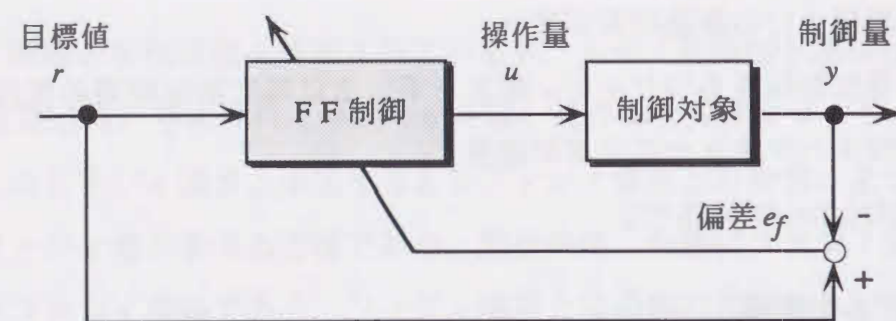
### 3.2.2 逆モデルの獲得

機械を生産している現場では、制御パラメータ調整の自動化や機差のバラツキあるいは制御対象の経年変化に対応するための適応機能が強く望まれている。このために制御対象の逆モデルを自動的に獲得する技術の実用化によるメリットは大きい。逆モデル構築の学習技術として図 3.1 に示すように制御偏差法、順逆モデル法、フィードバック誤差学習法がある。制御偏差法は制御対象の入出力間の特性が常に一定符号をとることを前提に学習が行われ<sup>124)-125)</sup>、順逆モデル法では順モデルを利用して逆モデルを得ており<sup>126)</sup>、フィードバック誤差学習法はフィードバック制御を適用し逆モデルを構築する<sup>127)</sup>。この技術は、フィードフォワード制御系の制御パラメータの自己調節に適用可能である。

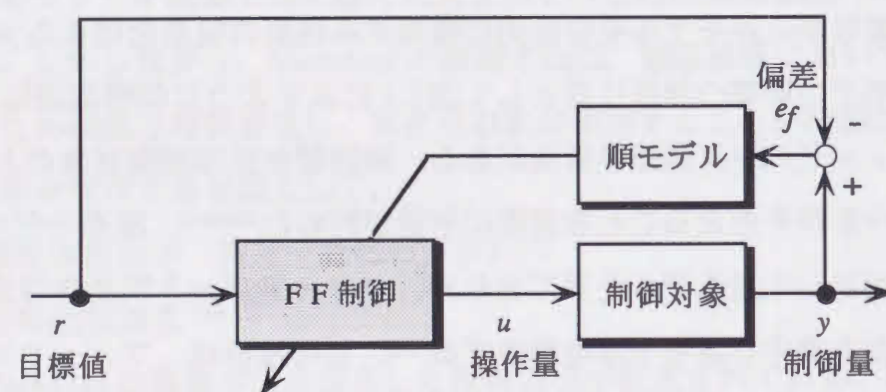
### 3.2.3 オートチューニングのための学習アルゴリズム

ファジィ制御では、経験的な制御ルールをファジィ関係として記述し、3.2.1 節で説明したファジィ推論により操作量を求める。したがって、一般に複雑な非線形現象を容易に扱えるにもかかわらず直感的に理解しやすく、また制御ルールの設計、変更、オペレータの介入などを容易にしている。しかしながら、言語的表現により知識の表現はできるものの、自分自身で知識を獲得することはできず、コントローラの入出力ゲインやファジィ制御規則の調整の困難さが問題になっている。これに対し、ニューラルネットワーク、勾配法、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) により、ファジィシステムの実際出力と望ましい出力との誤差を最小にするよう、メンバシップ関数の形状を規定するパラメータの調整や後件部定数の同定を行う方法が提案されている<sup>35-45), 46-55), 56-57)</sup>。ニューラルネットワークとファ

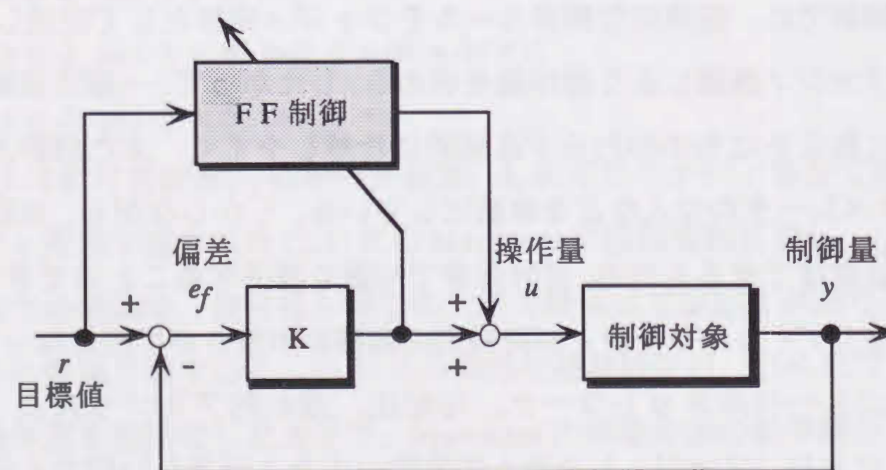




(a) 制御偏差法



(b) 順逆モデル法



(c) フィードバック誤差学習法

図 3.1 逆モデルを獲得するための学習スキーム

ジィ推論は、その融合の度合いから手法を分類されているが<sup>128)</sup>、ニューラルネットワークのファジィ制御への適用はその学習機能を生かして前述のファジィ制御の持つ問題点の解決を図るものである。生物の進化を模倣するGAによる方法では、ファジィシステムをパラメータ化し、そのパラメータの最適組合せをGAで求めるものである。

### 3.3 システム構成

本研究では、3.2.1節で述べた簡単な計算でファジィ推論が可能な簡略化推論法を用い、逆モデルを獲得するための学習スキームとして3.2.2節で示したフィードフォワードコントローラのパラメータ調整に適用可能なフィードバック誤差学習法において、3.2.3節の勾配法による学習アルゴリズムで制御パラメータの自動調整を行う自己調整ファジィコントローラ (Self-Tuning Fuzzy Controller) を用いている。

本油圧サーボシステムの制御目的は、伸縮軸の位置  $y$  のみを観測し、制御弁スプール位置を操作することにより、任意の姿勢において規範位置  $y_r$  に遅れなく出力位置を追従させることである。従来の制御システムは固定ゲインフィードバックコントローラで構成されており、最適なパラメータの調整には試行錯誤が必要であるうえ十分な追従特性も得られていない。提案するシステムは、図3.2(a)に示すようにPIコントローラを用いたフィードバック制御システムにフィードフォワードコントローラとしてSTFCを付加している。図中、 $y_r$ : 規範位置入力、 $v_r$ : 規範速度入力、 $\alpha_r$ : 規範加速度入力、 $y$ : 出力位置、 $e_f$ : 追従誤差信号、 $k_p$ : 比例ゲイン、 $k_i$ : 積分ゲイン、 $e_c$ : PIコントローラ出力、 $e_a$ : ファジィコントローラ出力、 $\mu_{ijk}$ : 前件部グレード、 $W_{ijk}$ : 後件部変数である。

STFCの目的は、油圧アクチュエータ固有の不感帯などの非線形性を補償し、規範位置と出力位置を一致させるために必要な操作量をファジィ推論により求めることである。STFCはルール調整部とファジィ推論部に機能上分けられる。ルール調整部では、追従誤差信号を零収束させるよう後件部変数を自動的に調整する。このことにより実機毎の制御ルールのチューニングが著しく簡略化でき調整工数が削減できる。また、ファジィ推論部では調整された制御ルールを用いて簡略法により操



作量を推論する。ファジィコントローラの入力信号は、規範速度  $v_r$ 、規範加速度  $\alpha_r$  および追従誤差信号  $e_f$  である。

作成するルールは、各入力信号を組み合わせて制御ルールを記述する方法として、クロス方式に加えて実用化を前提としてルール数を低減したリング方式、セパレート方式について検討する。

また、STFCの入力信号として図3.2(b)に示すように追従誤差信号  $e_f$  を含まないシステムとの比較をし、さらなる制御精度の向上を目指し図3.2(c)に示す速度ファジィコントローラを付加したシステムを検討している。

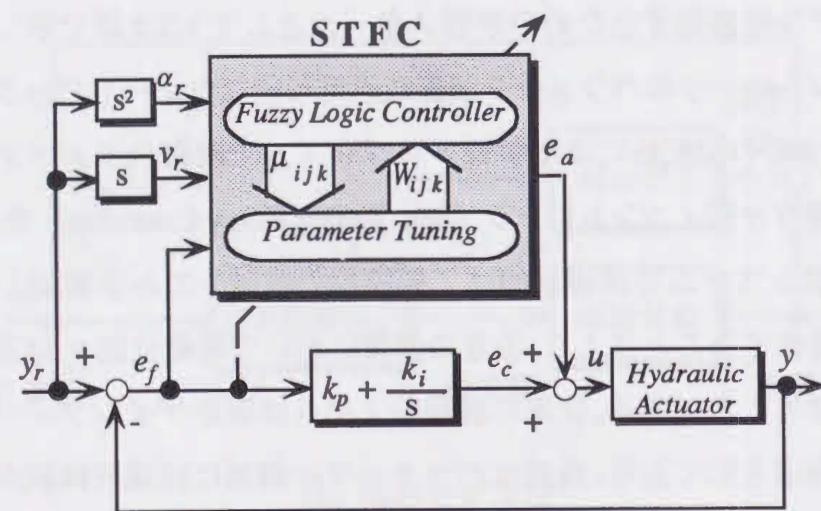


図 3.2(a) 誤差入力を含む STFC システム

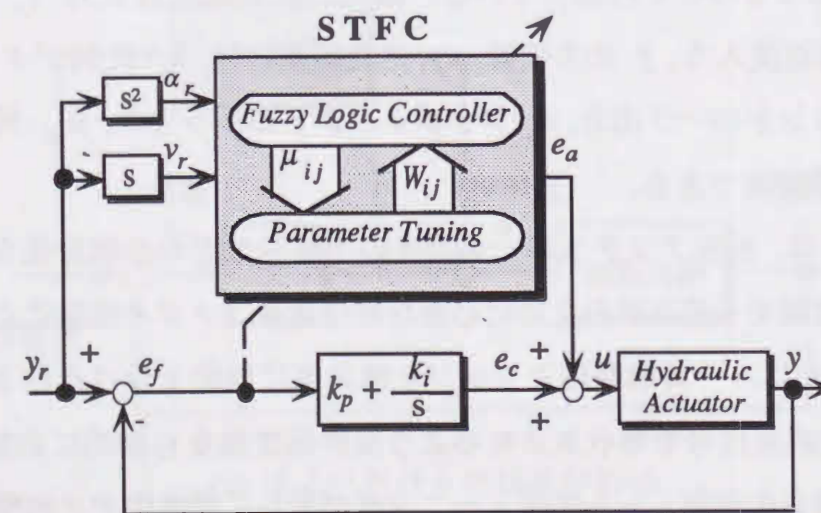


図 3.2(b) 誤差入力を含まない STFC システム

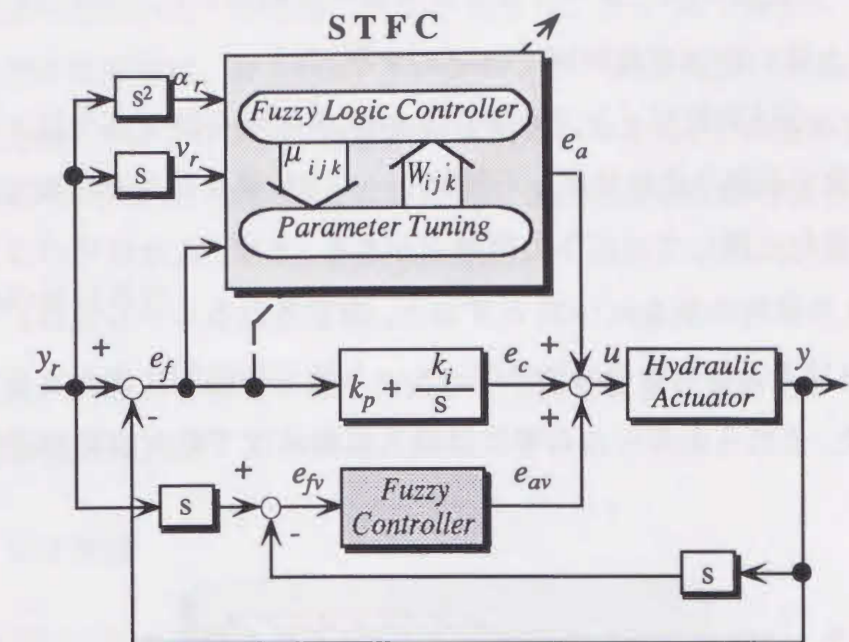


図 3.2(c) 速度ファジィコントローラを付加したシステム

### 3.4 自己調整ファジィフィードフォワードコントローラ

#### 3.4.1 クロス方式 STFC

図 3.3 に示すクロス方式のファジィ制御ルールは以下のように表される。

$$\text{if } v_r \text{ is } A_i \text{ and } \alpha_r \text{ is } B_j \text{ and } e_f \text{ is } C_k \text{ then } e_a \text{ is } W_{ijk}. \quad (3.4)$$

ここで  $v_r$ : 規範速度,  $\alpha_r$ : 規範加速度,  $e_f$ : 追従誤差で,  $e_a$ : ファジィ推論器の出力,  $A_i, B_j, C_k$ : 図 3.4 に示す NB(Negative Big) ~ PB(Positive Big) までのファジィ変数,  $W_{ijk}$ : シングルトンの後件部変数である。ここで規範速度, 規範加速度は機械の最大能力を考慮して正規化し, 追従誤差信号については試行錯誤により正規化ゲインを求める。クロス方式の STFC の出力  $e_a$  は, 荷重平均により  $n$  サンプルングにおいて次式で与えられる。

$$e_a(n) = \frac{\sum (\mu_i(n) \mu_j(n) \mu_k(n) W_{ijk}(n))}{\sum \mu_i(n) \mu_j(n) \mu_k(n)} \quad (3.5)$$

ここで,  $\mu_i, \mu_j, \mu_k$  は各入力信号のグレードである。また, 選択されたルールの後件



部変数  $W_{ijk}$  は、最急降下法により次式により求められる。

$$W_{ijk}(n+1) = \gamma e_f(n) \mu_i(n) \mu_j(n) \mu_k(n) + W_{ijk}(n) \quad (3.6)$$

ここで  $\gamma > 0$  は調整ゲインである。(3.4) 式から明らかなように、クロス方式では入力信号全ての組み合わせとして制御ルールが構築されるため設定が容易であるものの、実用化に際しては以下の問題点がある。まず、入力信号のファジィ分割数を  $l (=7)$ 、入力信号の数を  $m (=3)$  とすると、設定されるルール数は  $l^m (=7^3=343)$  個となる。これは入力信号数の増加に伴いルール数が指数的に増大することを意味している。また、それらのルールの中には最大規範速度で最大規範加速度をとるよ

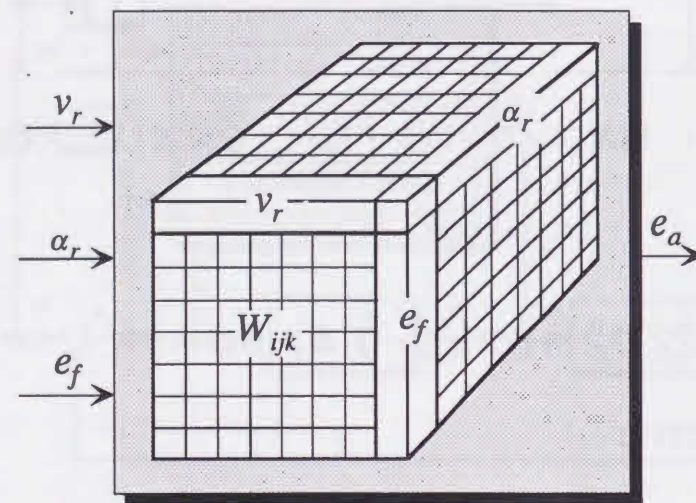


図 3.3 クロス方式 STFC

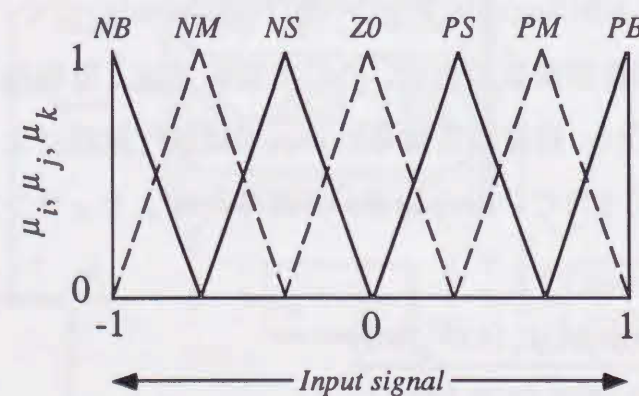


図 3.4 メンバシップ関数

うな物理的意味のないルールも存在する。さらに、(3.6) 式で各サンプリング毎に調整される後件部変数は、図 3.4 に示すメンバシップ関数を用いる場合、各入力信号に対してそれぞれ 2 つのファジィ変数が選択されるため、その組み合わせとして合計  $2^m (=8)$  個となる。これは大容量のメモリと高速な演算時間を必要とする。

### 3.4.2 ルール数低減化

クロス方式の問題点を解決するためにルール数の低減を目的として、次の 2 つの方式を検討する。

#### 3.4.2.1 リング方式

リング方式は、入力信号を予め 2 つの入力信号のペアに分割し、それぞれの 2 入力信号間で制御ルールを構成する。リング方式のルールテーブルを図 3.5 に示す。リング方式のファジィ制御ルールは以下のように記述される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } v_r \text{ is } A_i \text{ and } \alpha_r \text{ is } B_j \text{ then } e_{aij} \text{ is } W_{ij} \text{ and} \\ \text{if } v_r \text{ is } A_i \text{ and } e_f \text{ is } C_k \text{ then } e_{aik} \text{ is } W_{ik} \text{ and} \\ \text{if } \alpha_r \text{ is } B_j \text{ and } e_f \text{ is } C_k \text{ then } e_{ajk} \text{ is } W_{jk} . \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

この結果、リング方式のルール数は  ${}_m C_2 \times l^2 (=3 \times 7^2=147)$  個となり、クロス方式に比較してルール数は低減される。出力  $e_a$  は次式により求められる。

$$\left. \begin{array}{l} e_m(n) = \frac{\sum (\mu_m(n) W_m(n))}{\sum \mu_m(n)} \quad (m=ij, ik, jk) \\ e_a(n) = \sum e_m(n) \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

なお、サンプリング毎の調整ルール数は  $2^2 \times m (=12)$  個となり、クロス方式よりも増加する。

#### 3.4.2.2 セパレート方式

クロス方式に比較してリング方式はルール総数を低減できるものの、サンプリング毎の調整ルール数は増加し、実用的観点から更なる低減化が必要である。そこで、図 3.6 に示すように入力信号をそれぞれ独立にし、各信号の大きさに応じてゲ



インを調整するための制御ルールを設定したセパレート方式を提案する。セパレート方式の制御ルールは以下のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } v_r \text{ is } A_i \text{ then } e_{ai} \text{ is } W_i \text{ and} \\ \text{if } \alpha_r \text{ is } B_j \text{ then } e_{aj} \text{ is } W_j \text{ and} \\ \text{if } e_f \text{ is } C_k \text{ then } e_{ak} \text{ is } W_k. \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

セパレート方式でのルール数は  $l \times m$  ( $7 \times 3 = 21$ ) 個となり、著しい低減化が実現される。また、サンプリング毎の調整ルール数は  $2 \times m$  ( $=6$ ) 個であり、(3.10) 式に示すコントローラの出算式からも演算量は大幅に削減され、ソフトウェアサーボを構成する場合に CPU への負担が減少することがわかる。

$$\left. \begin{array}{l} e_m(n) = \frac{\sum (\mu_m(n) W_m(n))}{\sum \mu_m(n)} \quad (m=i, j, k) \\ e_a(n) = \sum e_m(n) \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

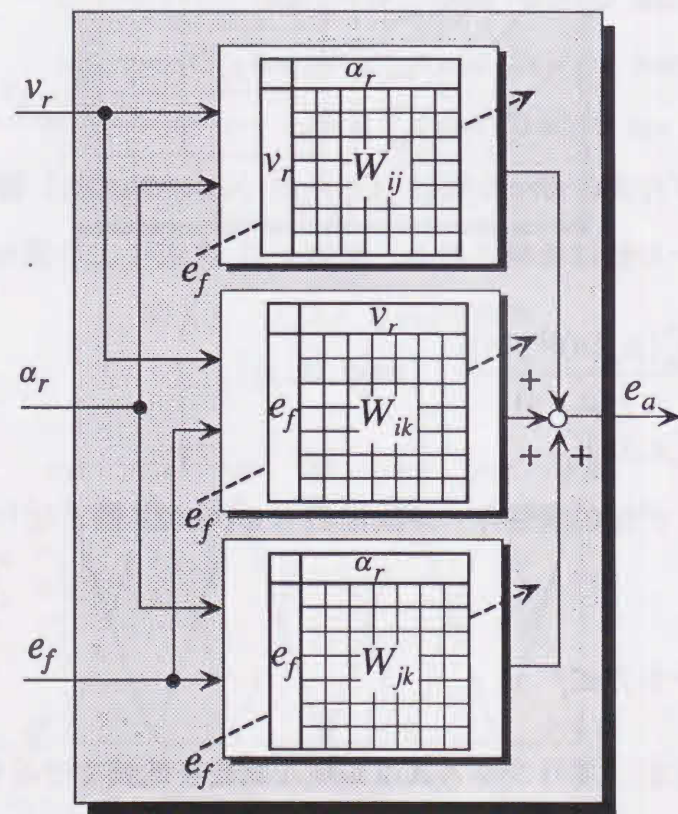


図 3.5 リング方式 STFC におけるルールテーブル

しかしながら、(3.9) 式から明らかなようにセパレート方式の制御ルールは、各入力信号の大きさに応じてゲインを調整する可変ゲインコントローラとみなすことができるため、各入力信号の組み合わせに応じて適切にゲインを調整するファジィ推論の特徴が薄れ、非線形性補償能力や汎化能力の低下が懸念される。3.5 節では各方式の STFC を実機に適用し、実用的な制御ルールの構成法について検討する。

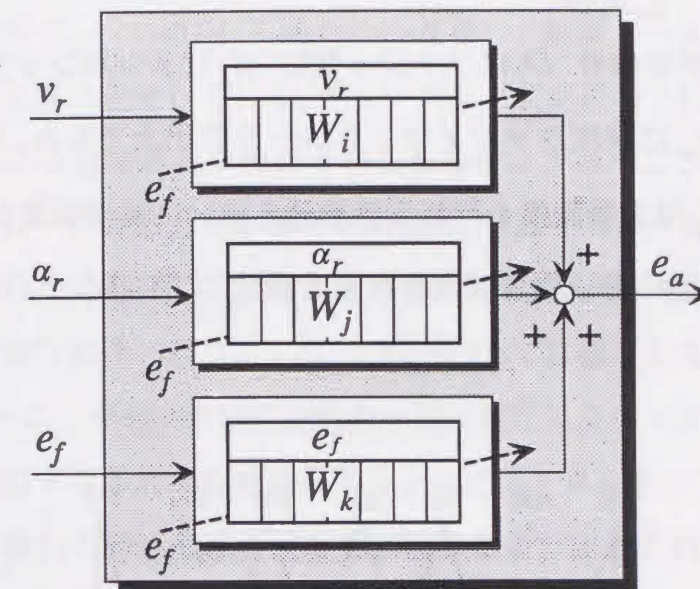


図 3.6 セパレート方式 STFC におけるルールテーブル

### 3.4.3 速度ファジィコントローラ

3.4.2 節では自己調整ファジィコントローラの実用化を前提として実装に要するメモリ量の削減とコントローラ出力の算出に必要な演算量を軽減するためのルール数低減化法について述べた。本節ではさらなる制御精度の向上を目指し図 3.2(c) に示した速度ファジィコントローラについて説明する。

速度ファジィコントローラは、固定ゲインフィードバック制御システムに STFC をフィードフォワードコントローラとして付加した二自由度位置制御システムに速度フィードバックループを持たせたものである。この速度フィードバックコント



ローラとしてファジィ制御を用いることにより非線形なコントローラを構成している（以下、これを速度ファジィコントローラと記述する）。推論方法はSTFCと同じく高速な推論が可能な簡略化推論法とし、図3.7に示す7分割三角型のメンバシップ関数を用いる。次式に制御ルールおよび出力算出式を示す。

$$\text{if } e_{fv} \text{ is } D_g \text{ then } e_{ag} \text{ is } W_g. \quad (3.11)$$

$$e_{av}(n) = \frac{\sum (\mu_g(n) W_g(n))}{\sum \mu_g(n)} \quad (3.12)$$

ここで、 $e_{fv}$ は速度誤差信号、 $D_g$ はファジィ変数、 $\mu_g$ はメンバシップ関数によって得られたグレード、 $e_{av}$ は速度ファジィコントローラの出力である。ただし、制御ルールの後件部変数 $W_g$ は自動調整を行わず経験値を用いて速度誤差が少ない場合は小さな値を、速度誤差の多い場合は大きな値を設定している。

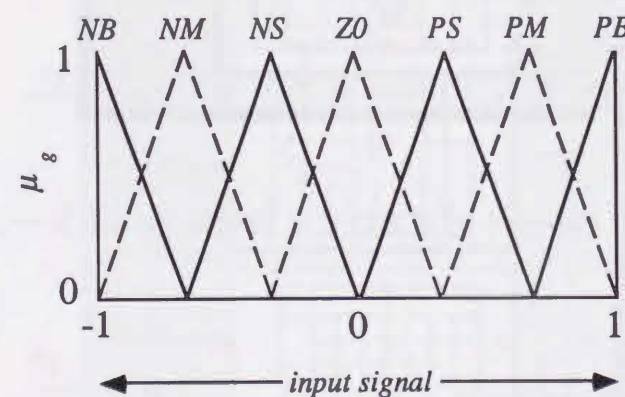


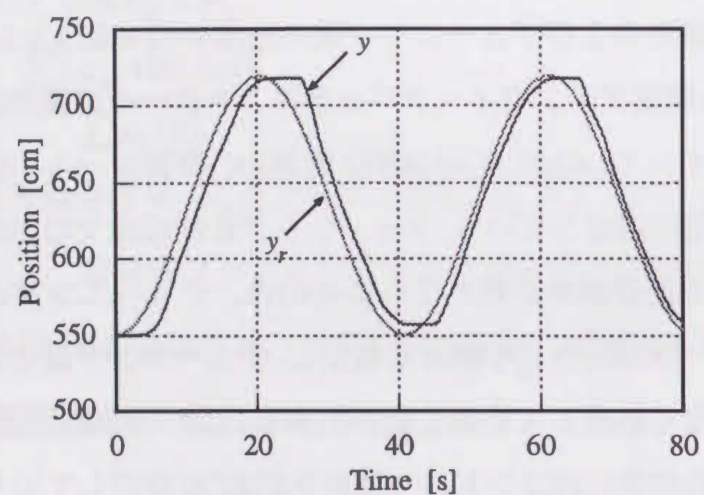
図 3.7 メンバシップ関数

### 3.5 実測結果

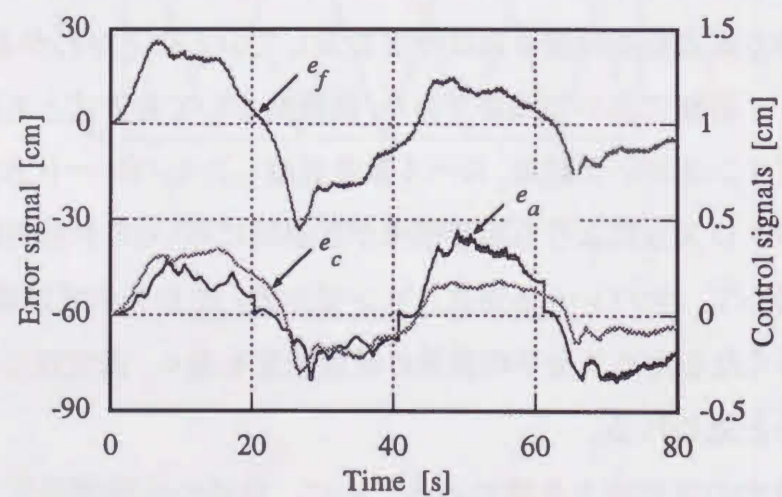
提案するルール数低減化の有効性を確認するために、2章の高所作業車のブーム伸縮軸を用い、各方式のSTFCによる追従特性を実測した。規範位置信号として6.35[m]を中心として振幅0.85[m]、周期40[sec]の正弦波を用いたときの各方式のチューニング初期段階およびチューニング後の応答特性を図3.8から図3.13に示す。いずれの方式も固定ゲインフィードバックコントローラは設計者が試行錯誤で調整した従来のゲイン( $k_p=0.01$ ,  $k_i=0.0005$ )を用い、制御ルールの調整パラメータの初期値はすべて零に設定している。チューニング初期段階では油圧アクチュエータの非線形性による追従誤差が現れているものの、チューニングの進行とともにファジィコントローラの出力 $e_a$ が徐々に増加し、チューニング後において出力位置は規範位置に遅れなく追従していることがわかる。これらの結果は、制御の主体がチューニングの進行に伴いPIコントローラからSTFCに移行していることを示している。また、チューニング後のSTFCの出力 $e_a$ は、油圧アクチュエータや油圧制御弁の加工精度に起因する非対称性を補償するよう正負で異なる大きさとなっており、操作方向が切り替わる時点では不感帯を補償するよう出力されている。図3.14はチューニング過程における各方式の二乗平均誤差である。これからもチューニング後において各方式とも同程度の追従精度を示していることがわかる。各方式の違いはチューニング初期において顕著であり、調整則として各方式とも同じ最急降下法および調整ゲインを用いた結果、ルール数を低減したセパレート方式あるいはリング方式の方がクロス方式よりも誤差収束が圧倒的に早い。これは時間的に変化する規範信号に対して、セパレート方式、リング方式、クロス方式の順に、1ルールの調整回数が多くなるため二乗平均誤差の収束速度も速く、適切なルールが簡潔に記述されていると思われる。

次に、各方式の汎化能力を確かめるために、前述の正弦波信号でチューニング後、後件部変数を固定し、周期20[sec]、振幅0.21[m]の正弦波規範信号および周期26[sec]、振幅0.21[m]の台形波規範信号に対する応答特性を実測した。図3.15および図3.16に各規範入力に対する応答特性を示す。この結果より、提案したセパレート方式は制御ルール数が他の方式に比較して少ないものの適切なゲイン調整が図ら



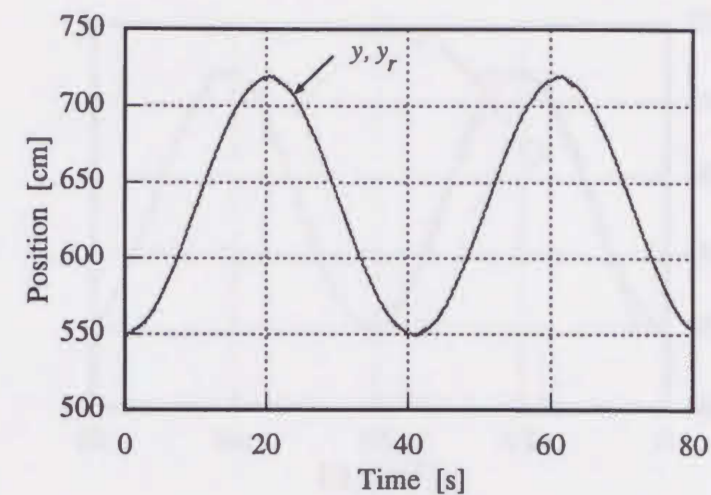


(a) Reference and actual positions

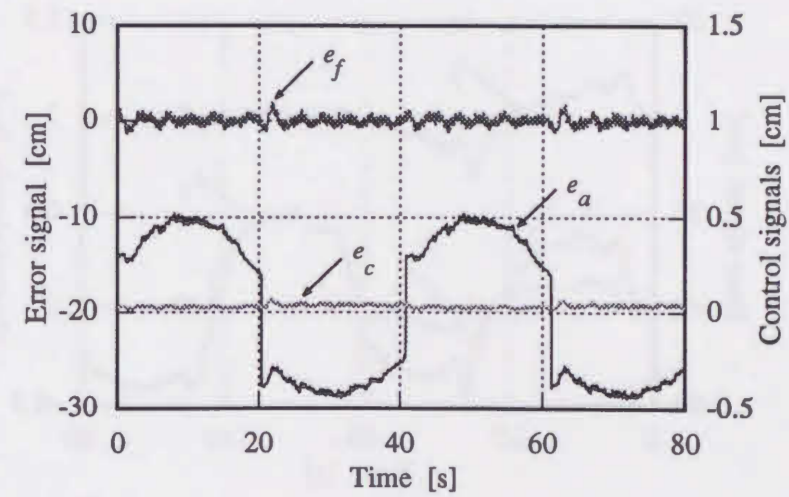


(b) Control and error signals

図 3.8 クロス方式 STFC のチューニング初期の応答特性



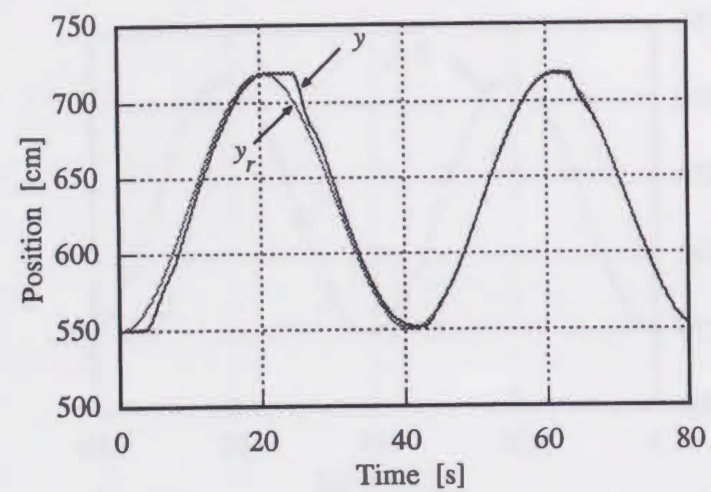
(a) Reference and actual positions



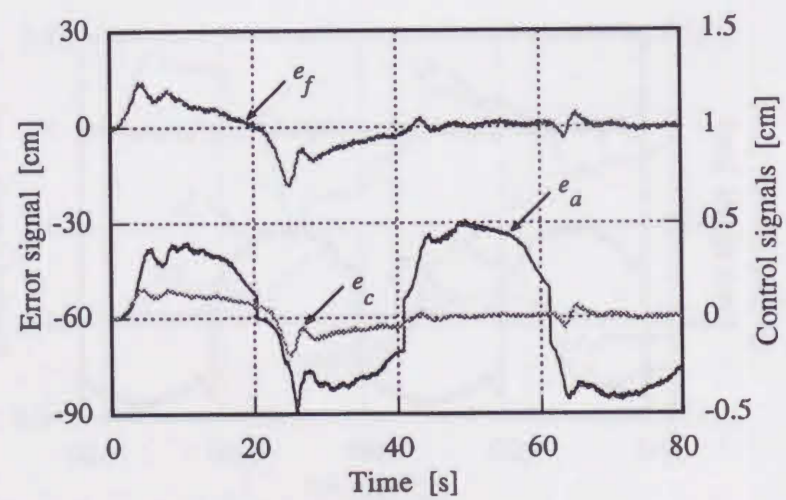
(b) Control and error signals

図 3.9 クロス方式 STFC のチューニング後の応答特性



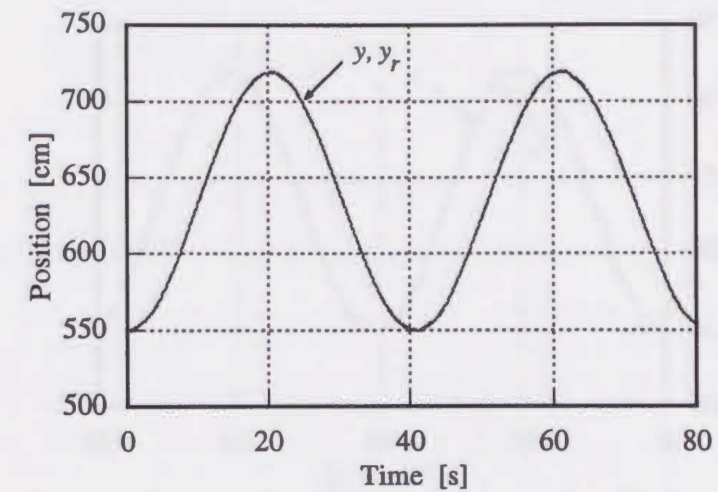


(a) Reference and actual positions

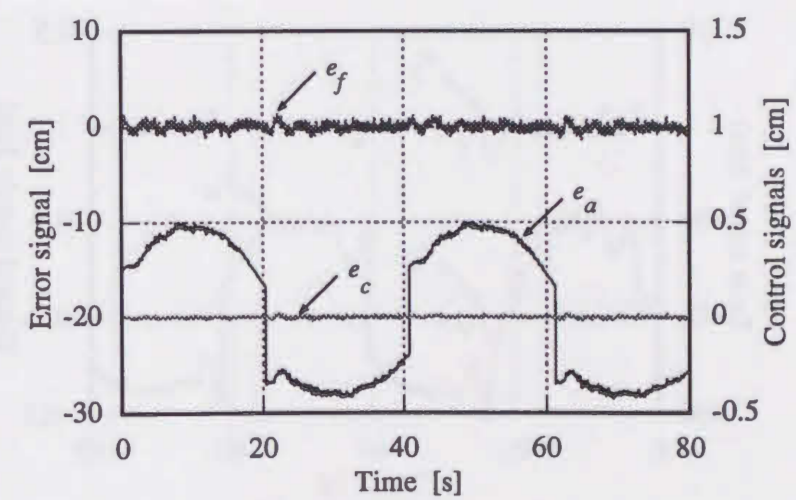


(b) Control and error signals

図 3.10 リング方式 STFC のチューニング初期の応答特性



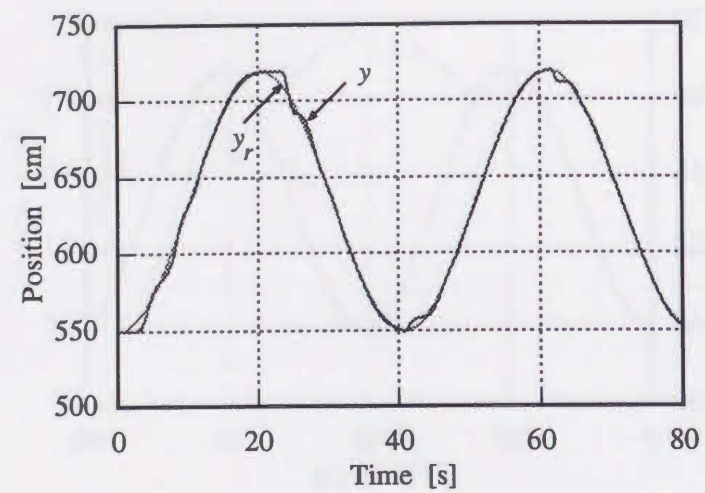
(a) Reference and actual positions



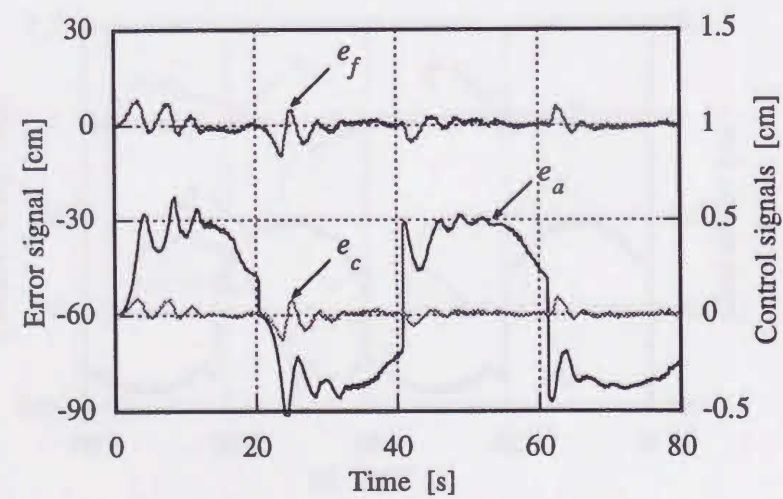
(b) Control and error signals

図 3.11 リング方式 STFC のチューニング後の応答特性



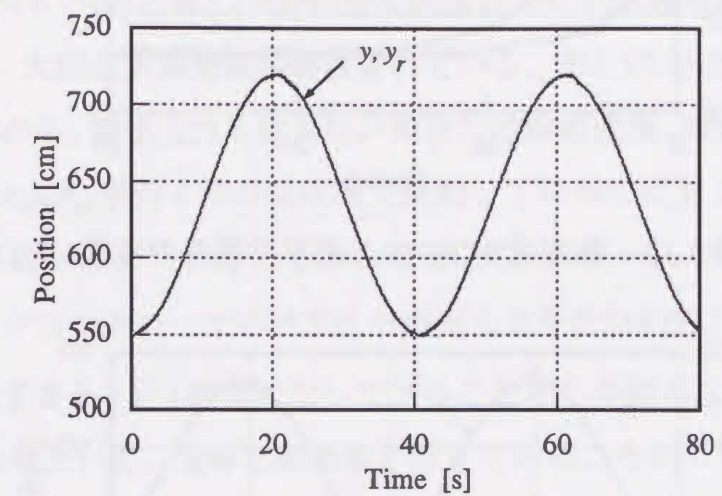


(a) Reference and actual positions

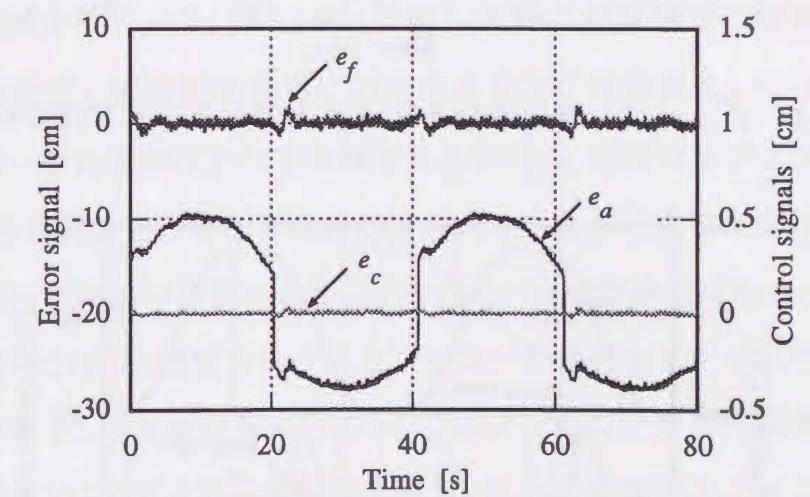


(b) Control and error signals

図 3.12 セパレート方式 STFC のチューニング初期の応答特性



(a) Reference and actual positions



(b) Control and error signals

図 3.13 セパレート方式 STFC のチューニング後の応答特性



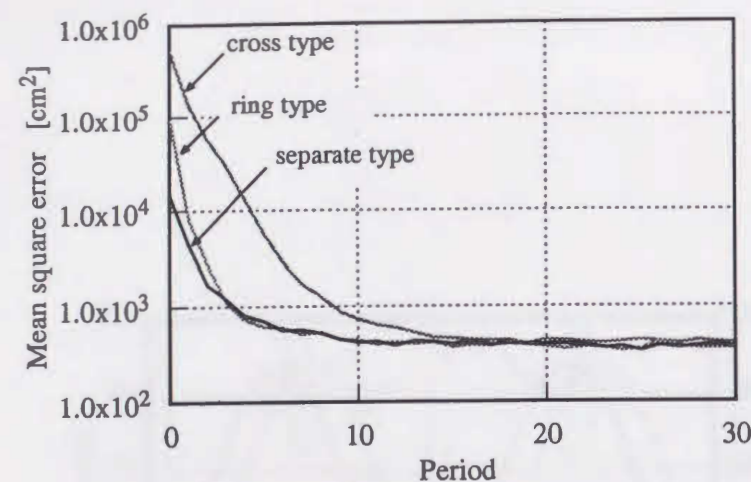


図 3.14 各方式 STFC の二乗平均誤差の応答

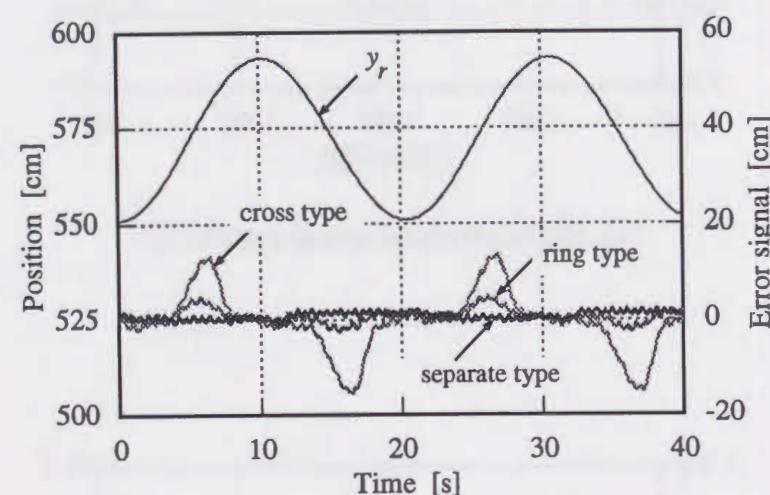


図 3.15 チューニングと異なる正弦波入での各方式 STFC の応答

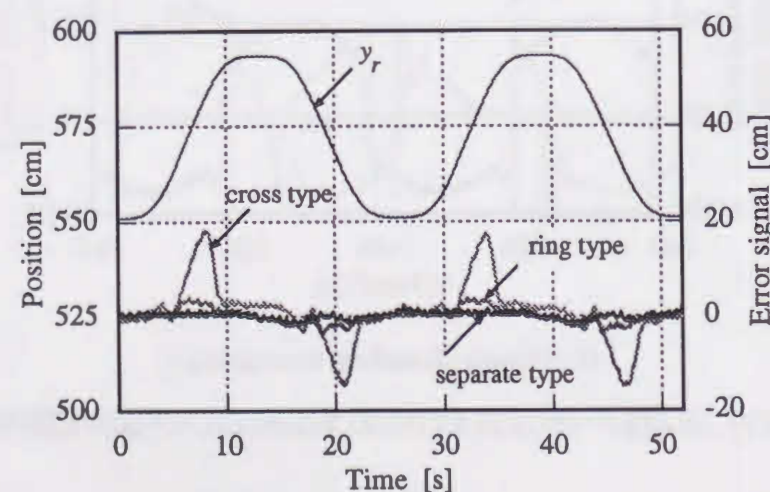
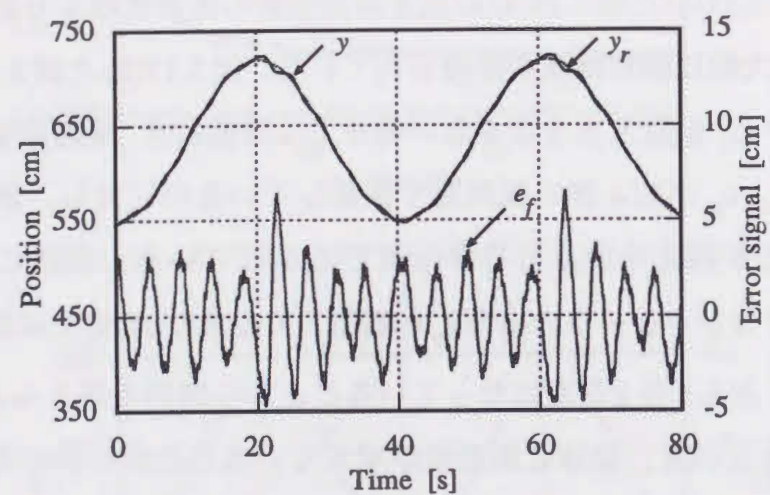


図 3.16 チューニングと異なる台形波入での各方式 STFC の応答

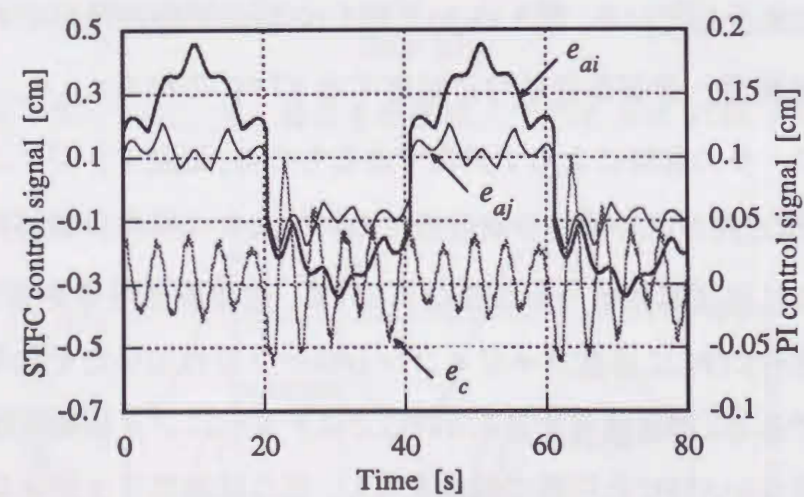
れているため、他の方式と同等以上の汎化能力を有していることが確かめられた。

つぎに図 3.2(a), 図 3.2(b) に示した STFC への入力として規範速度, 規範加速度に加え, 追従誤差信号の有無による結果および誤差信号を加えた STFC に速度誤差を入力とする速度ファジィコントローラを付加した結果をそれぞれ図 3.17 から図 3.19 に示す。図 3.17(a) と図 3.18(a) の追従誤差信号の応答波形から誤差入力を加えた STFC では, 大幅に制御精度が改善されている。図 3.17(b) と図 3.18(b) の制御信号の応答波形から, 誤差入力を含まない場合では規範速度, 規範加速度に対応する STFC の出力  $e_{ai}$ ,  $e_{aj}$  が約 4 秒の低周期で振動しているのに対し, 誤差入力を含む STFC では振動が抑えられなめらかな波形となっている。同様に, 固定ゲインフィードバックコントローラの出力  $e_c$  も誤差入力を含む STFC では低周期の振動が消え, その大きさも 3 分 1 程度になっていることから制御のほとんどが STFC により行われているといえ, 全体に振動数が増えていることから系の固有値が大きくなっていると考えられる。また, 同じ誤差入力を含む STFC に速度ファジィコントローラを付加したシステムでは, 図 3.18(a) と図 3.19(a) の追従誤差信号の応答波形からさらに制御精度が改善されており, 特に STFC のみの場合に最も大きな誤差を発生する操作方向の切り替わり点近傍において, 速度ファジィコントローラの付加により誤差は減少している。図 3.18(b) と図 3.19(b) の制御信号の応答波形から規範速度, 規範加速度, 追従誤差信号に対応する STFC の出力  $e_{ai}$ ,  $e_{aj}$ ,  $e_{ak}$  は速度ファジィコントローラの有無によらず同様であるものの, 速度ファジィコントローラの出力  $e_m$  が操作方向の切り替わり点近傍において大きく出力し制御精度を改善している。図 3.20 は追従誤差信号を含まない STFC, 追従誤差信号を含む STFC および誤差信号を含む STFC に速度ファジィコントローラを付加したそれぞれの二乗平均誤差の応答である。誤差信号を含む STFC ではチューニング初期段階においても誤差信号を含まない STFC と同等の精度を有し, さらに速度ファジィコントローラを付加した場合はより制御精度の向上が実現できている。チューニング後の誤差信号を含まない STFC と誤差信号を含む STFC の伸び方向の後件部変数を図 3.21, 図 3.22 に, 最急降下法による自動調整を行わず経験値を用いて設定した速度ファジィコントローラの後件部定数を図 3.23 に示す。図 3.21, 図 3.22 から誤差入力を含む



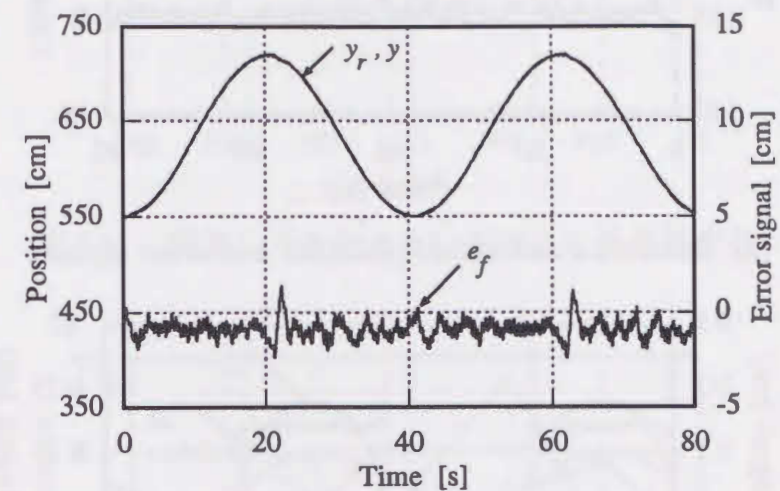


(a) Reference and actual positions and error signal

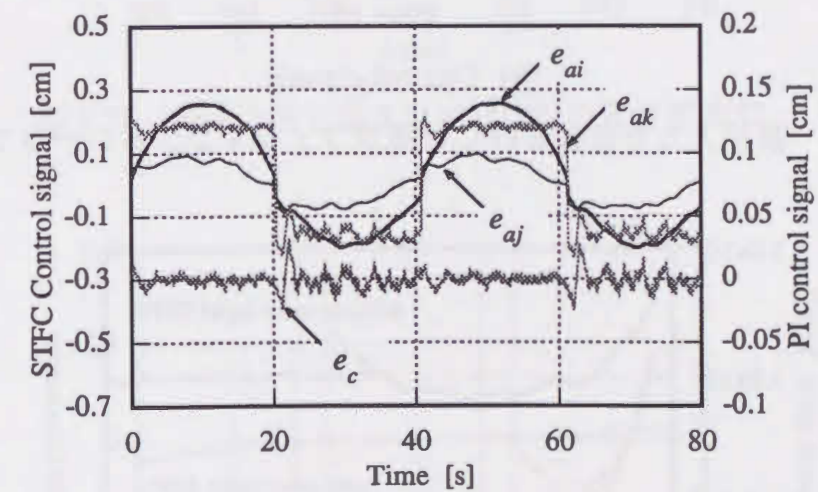


(b) Control signals

図 3.17 誤差入力を含まない STFC の応答



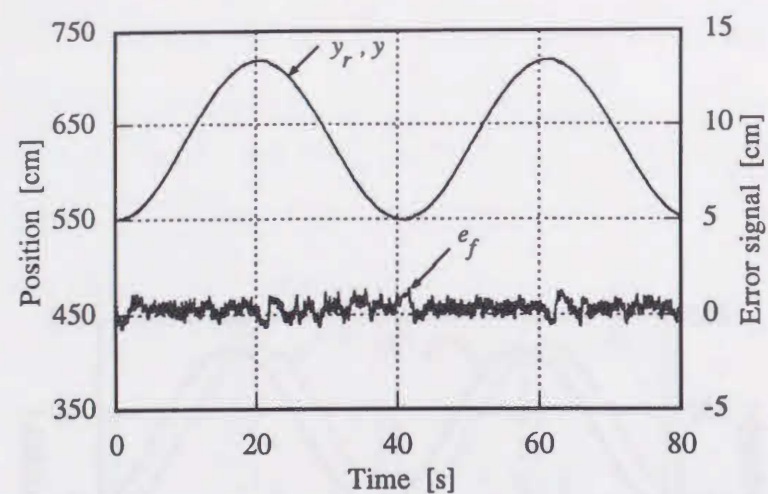
(a) Reference and actual positions and error signal



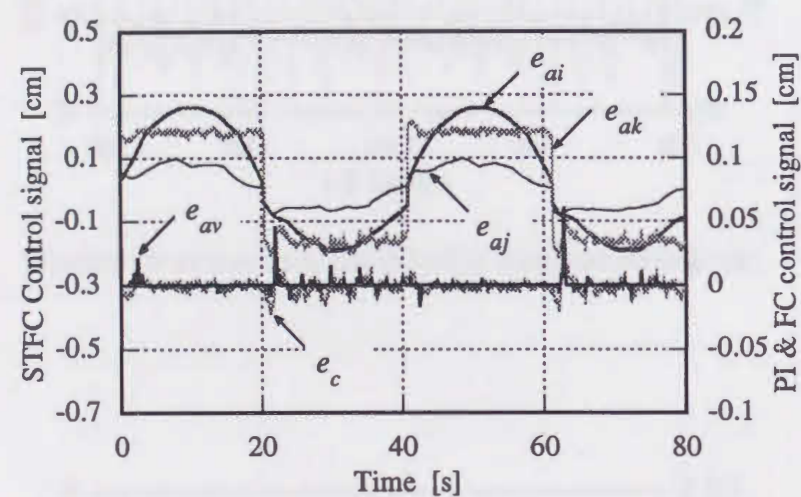
(b) Control signals

図 3.18 誤差入力を含む STFC の応答





(a) Reference and actual positions and error signal



(b) Control signals

図 3.19 誤差入力を含む STFC と速度ファジィコントローラでの応答

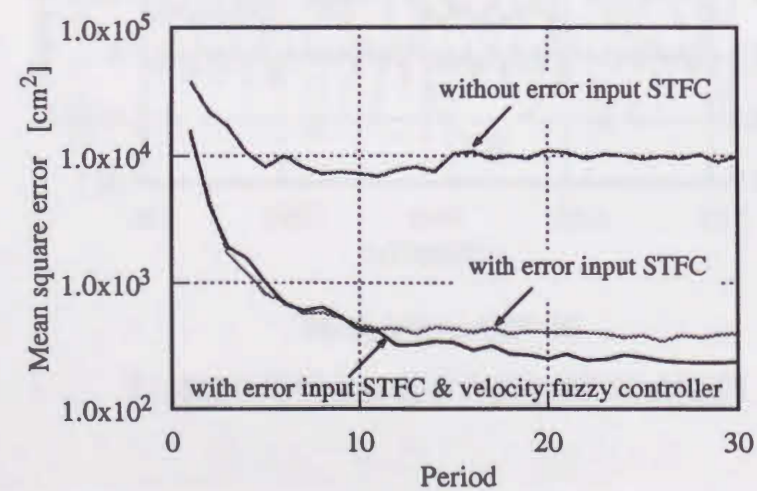


図 3.20 二乗平均誤差の応答

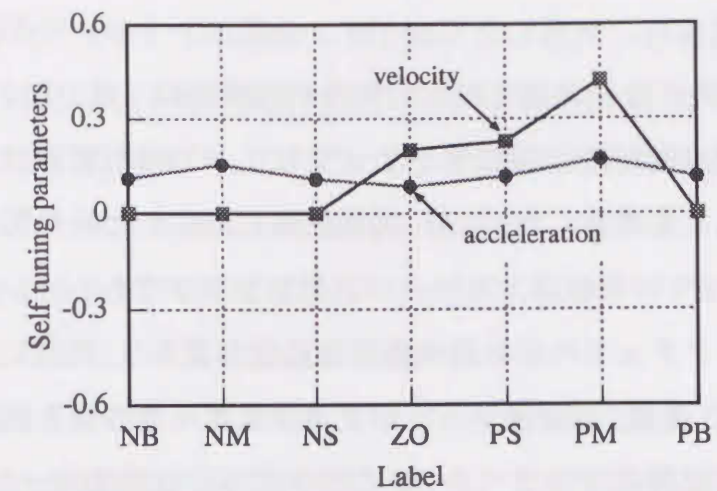


図 3.21 誤差入力を含まない STFC の後件部変数

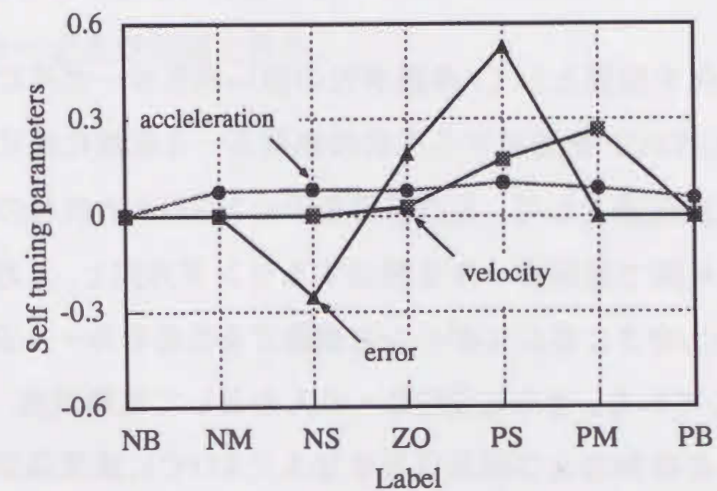


図 3.22 誤差入力を含まない STFC の後件部変数

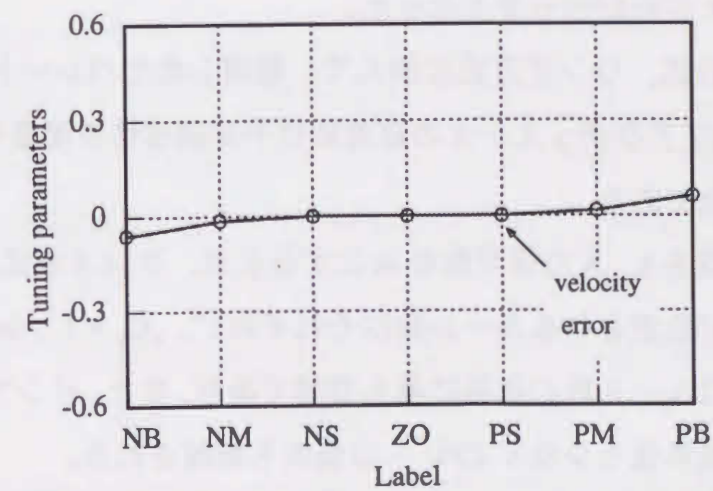


図 3.23 速度ファジィコントローラの後件部変数



STFCでは、追従誤差信号に対応した可変ゲイン比例コントローラが構成されていることがわかる。また、規範速度に対応した後件部変数は2章の図2.6に示した電磁比例流量制御弁の流量特性の逆写像となっており、STFCが制御対象の逆システムを構成していることを確認した。なお、規範速度に対応した後件部変数のうちラベルPBがゼロとなっているのは、スケーリングファクタであるメンバシップ関数の正規化ゲインをアクチュエータの最大能力に設定しており、実測に用いた規範正弦波信号は振幅位置、速度、加速度すべてがアクチュエータの能力範囲内となるように設定したため、規範速度のラベルPBに相当する入力が無かったためである。

### 3.6 まとめ

本論文では、実用化を前提として、非線形性の強い油圧サーボ系に自己調整ファジィコントローラ（STFC）を適用する場合の制御ルール低減化法について検討した。制御ルールの低減化法として、入力信号を予め2つの入力信号のペアに分割しそれぞれの2入力信号間で制御ルールを構成するリング方式と、入力信号をそれぞれ独立にし各信号の大きさに応じてゲインを調整するためのルールを構成するセパレート方式を比較している。さらにSTFCへの入力として規範速度、規範加速度に加え、追従誤差信号の有無および誤差信号を加えたSTFCに速度誤差を入力とする速度ファジィコントローラを付加したシステムについて検討した。提案した各方式を高所作業車のブーム伸縮軸の油圧アクチュエータに適用し、追従特性を実測した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) 従来のクロス方式、リング方式に加えて、提案したセパレート方式を用いたSTFCはともに油圧アクチュエータの非対称性や非線形性を補償し、追従特性の著しい改善に有効である。
- (2) ファジィ分割数を $l$ 、入力信号数を $m$ とすると、クロス方式、リング方式、セパレート方式で設定されるルール数はそれぞれ $l^m$ 、 $mC_2 \times l^2$ 、 $lm$ となり、特に、セパレート方式はルール数の低減に最も有効であり、また、サンプリング毎に出力算定に要する演算量も少なくCPUへの負担も軽減される。
- (3) さらに、セパレート方式は他の方式より冗長度の低いルール構成から調整が高

速に行われるとともに、汎化能力に優れる。

- (4) STFCへの入力として規範速度、規範加速度に加え、追従誤差信号を用いることはSTFC内に可変比例ゲインコントローラを構成することとなり、従来の固定ゲインコントローラでは設定し得なかった高ゲインにできる。
- (5) 誤差信号を加えたSTFCに速度誤差を入力とする速度ファジィコントローラを付加することにより、一層の制御精度の向上が図れる。

以上より、油圧サーボ系の実用的観点から、追従特性の改善と調整工程の簡略化に対し、制御ルール低減化法においてセパレート方式を用いたSTFCが最も有効であると思われる。また、STFCへの入力に追従誤差信号を加え、速度ファジィコントローラを付加することで非線形なフィードバックコントローラが構成され、より高精度な油圧サーボ系が実現できる。



## 第4章

### ファジィ制御を用いた多軸協調制御システム

#### 4.1 まえがき

産業界の多くのメカニカルシステムにおいては、位置決め制御よりも経路制御の方が重要な場合が多い。経路制御の場合には、制御の良否は複数軸の制御系の協調動作の結果として評価されるため、各軸の時間目標値への追従性に加えて、各軸間の協調性を考慮する必要がある。例えば、鉄鋼関連の製造工場ですべてといって良いほど用いられる溶接ロボットでは、質の高い製品作りのために溶接面と溶接トーチとの距離や角度を一定に保たなければならない。そのためには溶接ロボットの手先の折り曲げ動作、伸縮動作、溶接トーチの折り曲げ動作を協調させねばならない<sup>60),129)-130)</sup>。また、建設機械ではパワーショベルでの側溝掘削やのり面作業にブーム動作、スティック動作、バケット動作を、旋回式クレーンでは吊り荷の水平移動にブームの起伏動作、伸縮動作、ウインチ動作をおのおの協調させる必要がある<sup>131)-133)</sup>。一般に、協調には2通りの意味がある。1つは利害の対立する双方が競合しないように問題を解決すること。もう1つは双方が相補的に協力しあって目的を達成することである。油田<sup>134)</sup>によれば、

①消極的協調；各ロボットが他のロボットの行動にできる限り影響を与えないように振る舞う協調。

②積極的協調；各ロボットが同期して行動することによって、単一のミッションを達成するような協調、物理的な共同作業などがこれにあたる。

と定義されており、本研究での協調とは、各軸の動特性や各軸の目標値が異なったものどうしが互いに譲り合い調和して共通の目標を達成することである<sup>135)-140)</sup>。

ところで、建設機械などの作業機械は、マクロには人間の運動の増力装置であり、常に人間がループの中に存在することを前提とした機械である。こうした人間操縦型の作業機械では、人間の意志どおりに動かせることが目標となる。しかしながら、機械構造の制約を受けて操作レバーは個々の油圧バルブに1対1に対応して

おり、オペレータが意図した動作を行うにはいくつもの操作レバーを同時に協調して操作しなければならない。本研究で対象とした伸縮ブーム型高所作業車においても、ブーム先端に取り付けられた作業台の移動は複数の駆動軸の合成動作により行われる。オペレータにとって効率よい作業は、目的の位置まで短時間で移動することであり、そのために目的位置まで直線に移動する最短経路を目指すこととなる。作業台を空間内でブーム軸方向以外に直線に移動させるには、複数の駆動軸を同時に操作せねばならず、しかも4軸ともなれば熟練者といえども困難である。そこで、作業効率を向上させ、オペレータの負荷を軽減し、より一層の作業の安全を確保するために、この複合動作の自動化、操作の簡略化が必要である。

しかしながら、第2章において各駆動軸の特性は油圧制御弁の不感帯、片ロッドシリンダの非対称性や摩擦等により非線形性が強く、動特性は互いに大幅に異なっており、また、動作条件により変動することを述べた。このような駆動軸を用いて作業台を直線に移動させるには、各軸が独立に動作するのではなく互いに協調して動作しなければならない。さらに、経路制御の性能の判定指標は3章で述べた位置決め制御ほど単純ではなく、一般的な判定指標を求めることは困難である。しかし、経路目標値を限定した場合には指標が与えられる場合も多く<sup>141),142)</sup>、伸縮ブーム型高所作業車の作業台の垂直・水平移動制御はこれに充当する。

本章では、実用化を前提とした多軸油圧サーボシステムの協調動作について検討している。提案するシステムは、非干渉化制御システムおよびモデルに基づく協調制御システムである。両制御システムともに、各軸の追従特性の改善のために第3章で提案したセパレート方式STFCを用いている。協調動作特性を改善するために、非干渉化制御システムでは、①の消極的協調の観点から駆動軸間の相互干渉を抑制する非干渉化コントローラを導入し、モデルに基づく協調制御システムでは、②の積極的協調の観点から経路制御の性能の判定指標をもとにした協調動作コントローラを用いている。

以下では提案した油圧サーボシステムの構成および制御アルゴリズムについて詳述し、協調動作として高所作業車の作業台の垂直移動および水平移動に適用した場合の応答特性の実測結果から、提案したシステムの有用性を明らかにしている。



## 4.2 非干渉化制御システム

第2章に示した供試高所作業車の実測結果より駆動軸間の相互干渉は、伸縮動作は起伏角度に影響され、起伏動作は伸縮位置に大きく依存していることが分かる。そこで、伸縮軸には起伏角度に、起伏軸には伸縮位置に基づいたファジィ制御による非干渉化コントローラを導入し、駆動軸間の相互干渉を抑制し、協調動作特性の改善を図る。

### 4.2.1 制御システム

図4.1に提案する非干渉化制御システムの構成を示す。図中、 $F$ は後述する座標変換で、オペレータが操作するデカルト座標系の入力を各駆動軸の成分を表す関節座標系に変換する。添字 $l, \theta$ はそれぞれブームの伸縮軸、起伏軸の各駆動軸成分を示す。各駆動軸は固定ゲインPIコントローラからなるフィードバックループにSTFCが付加されている。また、軸間の相互干渉を抑止し高精度の協調動作を実現するための非干渉化コントローラが設けられている。図中、 $l_r, \theta_r$ :各軸規範位置、 $v_l, v_\theta$ :各軸規範速度、 $\alpha_l, \alpha_\theta$ :各軸規範加速度、 $l, \theta$ :各軸位置出力、 $e_{fl}, e_{f\theta}$ :各軸追従誤差信号、 $k_{pl}, k_{p\theta}$ :比例ゲイン、 $k_{il}, k_{i\theta}$ :積分ゲイン、 $e_{cl}, e_{c\theta}$ :各軸PIコントローラ出力、 $e_{dl}, e_{d\theta}$ :各軸ファジィコントローラ出力、 $e_{al}, e_{a\theta}$ :各軸への非干渉化コントローラの出力である。

制御目的は、各駆動軸の動作により得られる作業台の位置を規範軌道上に保ちつつ、各軸規範位置と出力位置を一致させることである。そのためSTFCへの入力信号は、規範速度および規範加速度を、非干渉化コントローラには相手軸の位置を用い、それぞれ追従特性の改善および軸間の相互干渉を補償するために必要な操作量をファジィ推論により求める。STFC、非干渉化コントローラともにファジィ制御ルールは各軸の追従誤差信号を零収束させるようチューニングされる。

### 4.2.2 非干渉化ファジィコントローラ

提案する非干渉化ファジィコントローラの制御ルールは、前件部の唯一の命題が与えられるため、以下のように記述される。

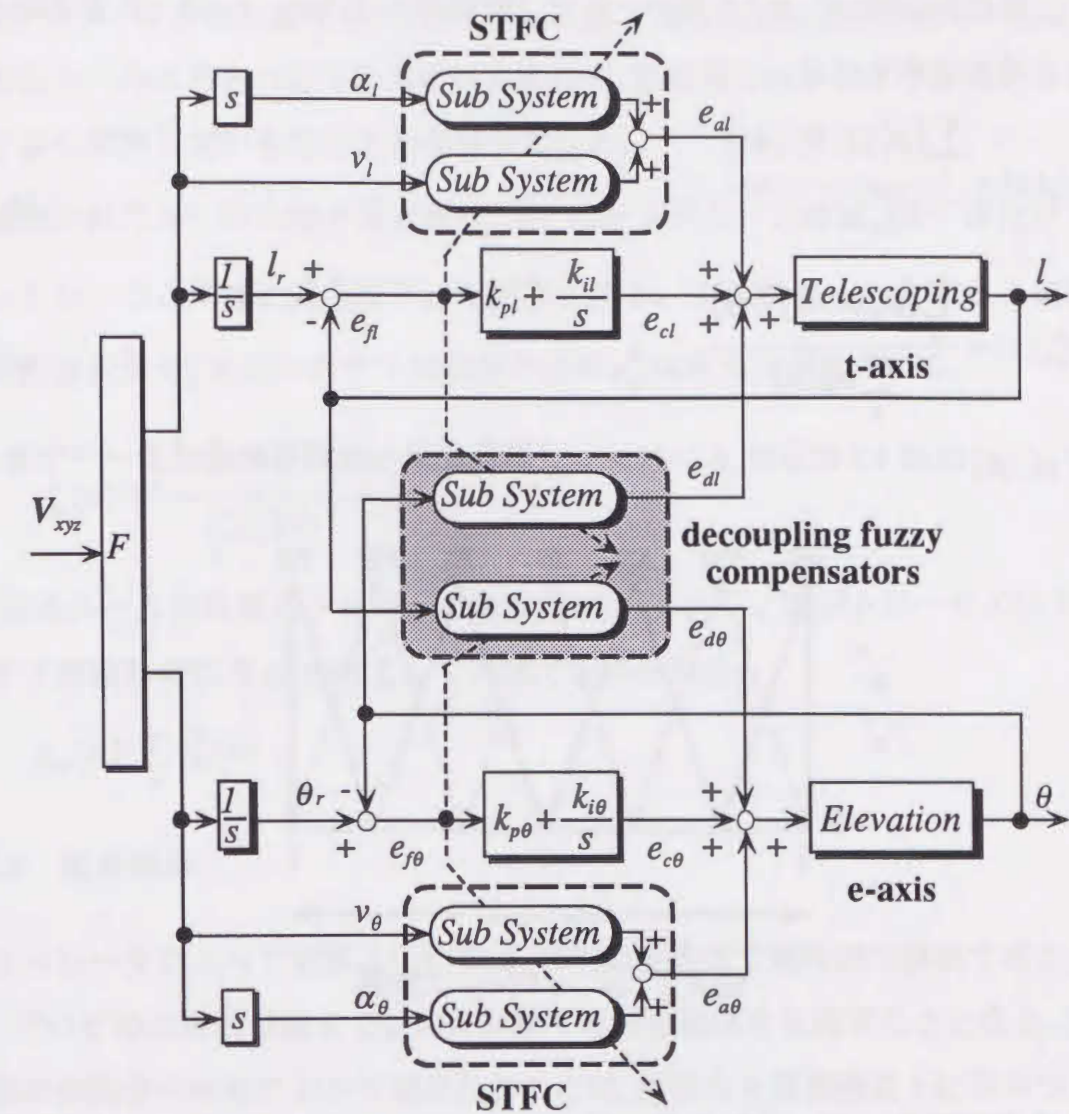


図4.1 非干渉化協調制御システム構成

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } \theta \text{ is } C' \text{ then } e_{dl} \text{ is } W_l' \\ \text{if } l \text{ is } D'' \text{ and } e_{d\theta} \text{ is } W_\theta'' \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

ここで  $l, \theta$  は各軸の位置、 $e_{dl}, e_{d\theta}$  はサブ推論器の出力、 $W_l', W_\theta''$  は後件部変数、 $C', D''$  は図4.2に示すNB(Negative Big)～PB(Positive Big)までのファジィ変数である。本制御ルールは相手軸の位置に応じて、各信号にかかるゲインをファジィ推論により調整していることを意味している。

ファジィコントローラの各入力信号に対して2つのファジィ変数が選ばれる。ここで選ばれたルールの後件部変数  $W_l', W_\theta''$  はシングルトンとし、最急降下法により調整される。後件部変数を調整する誤差信号は各軸追従誤差信号  $e_{fl}, e_{f\theta}$  である。調



整された後件部変数  $W_l^i, W_\theta^u$  を用い、各サブ推論器の出力  $e_{dl}, e_{d\theta}$  は、荷重平均により各々次式で求められる。

$$e_{dl}^i(n) = \frac{\sum_l (\mu_l^i(n) W_l^i(n))}{\sum_l \mu_l^i(n)} \quad (4.2)$$

$$e_{d\theta}^u(n) = \frac{\sum_u (\mu_\theta^u(n) W_\theta^u(n))}{\sum_u \mu_\theta^u(n)} \quad (4.3)$$

ここで  $\mu_l^i, \mu_\theta^u$  は図 4.2 に示すメンバシップ関数によって得られるグレードである。

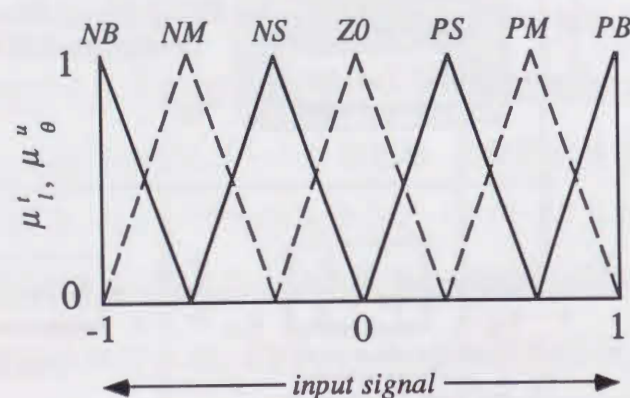


図 4.2 メンバシップ関数

#### 4.2.3 自己調整ファジィコントローラ

通常、ファジィ制御に用いられている制御ルールは、前件部の複数の命題が and で接続された形式で記述される。それゆえ、入力信号数とファジィ分割数が増加するにつれ調整すべきパラメータ数は著しく増加する。そこで、第3章で述べた実用化を前提として演算時間とメモリ容量を低減した簡略化アルゴリズムを用いている。提案するファジィコントローラの制御ルールは以下のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } v_q \text{ is } A_q^i \text{ then } e_{sq}^i \text{ is } W_q^i \text{ and} \\ \text{if } \alpha_q \text{ is } B_q^j \text{ then } e_{sq}^j \text{ is } W_q^j. \quad (q=l, \theta) \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

ここで  $v_q$  は規範速度、 $\alpha_q$  は規範加速度、 $e_{sq}^i, e_{sq}^j$  はサブ推論器の出力、 $W_q^i, W_q^j$  は後件部変数、 $A_q^i, B_q^j$  は NB(Negative Big) ~ PB(Positive Big) までのファジィ変数である。

また、添字  $q$  は各軸を意味し、それぞれ  $q=l, \theta$  である。(4.4) 式から明らかなように、本制御ルールは各入力信号の大きさに応じて、各信号にかかるゲインをファジィ推論により調整していることを意味している。

選択されたルールの後件部変数  $W_q^i, W_q^j$  はシングルトンとし、非干渉化ファジィコントローラと同様に最急降下法で調整される。ここで、 $h=i, j$  とすると調整された後件部変数  $W_q^h$  を用い各サブ推論器の出力  $e_{sq}^h$  は次式で求められる。

$$e_{sq}^h(n) = \frac{\sum_h (\mu_q^h(n) W_q^h(n))}{\sum_h \mu_q^h(n)} \quad (4.5)$$

$\mu_q^h$  は各ルール前件部のグレードであり、また、ファジィコントローラの出力  $e_{aq}$  は各サブ推論器の出力  $e_{sq}^h$  の和として次式で求められる。

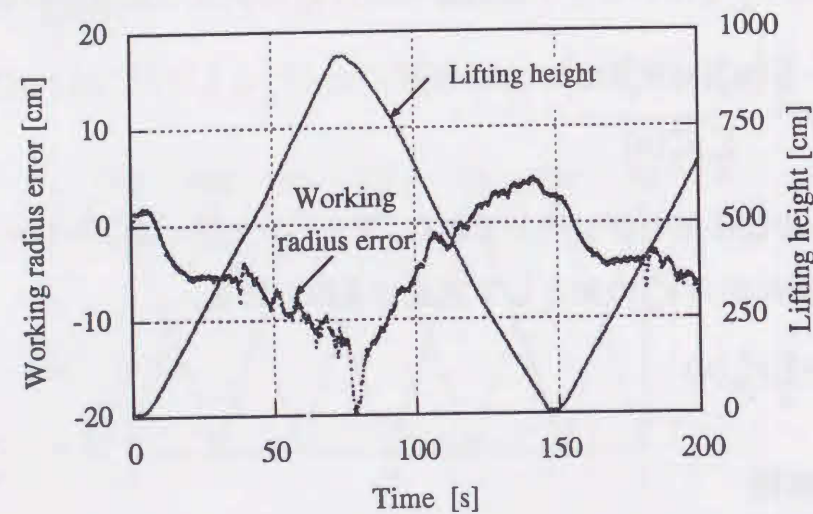
$$e_{aq}(n) = \sum_h e_{sq}^h(n) \quad (4.6)$$

#### 4.2.4 実測結果

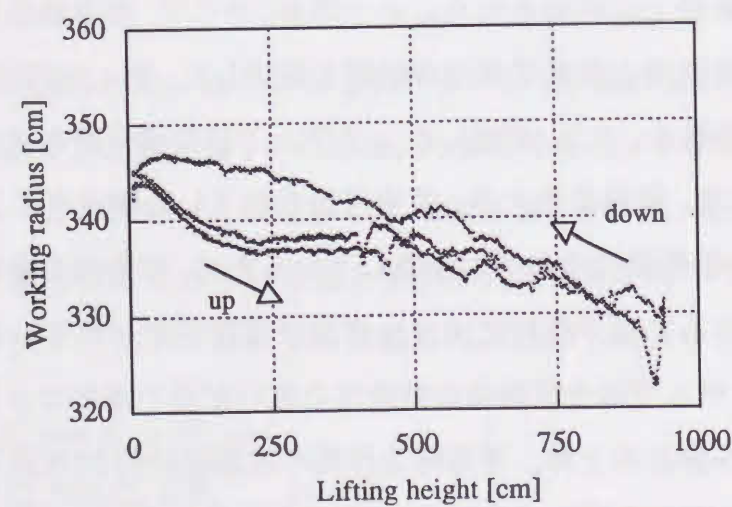
オペレータにとって効率よい作業は、目的の位置まで短時間で移動することであり、そのために目的位置まで直線に移動する最短経路を目指すこととなる。高所作業車の作業台の移動において望まれることは、作業台を目標軌道上に保ちつつ可能な限り高速に一直線上を移動させることである。そこで、垂直移動を行った場合の作業台の時間応答波形と鉛直平面内の軌跡を測定した。図 4.3 に固定ゲイン PI コントローラでの応答特性を、また、提案したシステムで後件部変数を調整した後の応答特性を図 4.4 に示す。実験結果より、従来用いられていた固定ゲイン PI コントローラの場合、各駆動軸はそれぞれ独立しているため、駆動軸の動特性の違いにより作業台の上昇あるいは下降時に大きな作業半径誤差が現れている。これに対して、提案したシステムでは各駆動軸の動特性の違いが非干渉化コントローラにより補償されるため作業台の上昇、下降時の作業半径誤差は約 37% 以下に抑えられている。また、移動速度も平均で約 40% 高速化することができている。ここで、非干渉化コントローラの有効性を明確にするために非干渉化コントローラの有無を比較した。図 4.5 は非干渉化コントローラを持たず STFC のみで垂直移動を行った場



合の作業半径誤差を示し、図4.6はSTFCに加えて非干渉化コントローラを有する場合の結果である。これより非干渉化コントローラを有する場合の方が作業半径誤差がより小さく抑えられており、駆動軸間の干渉を抑制し、協調動作が行われていることがわかる。図4.7、図4.8は非干渉化コントローラの有無それぞれの調整後の



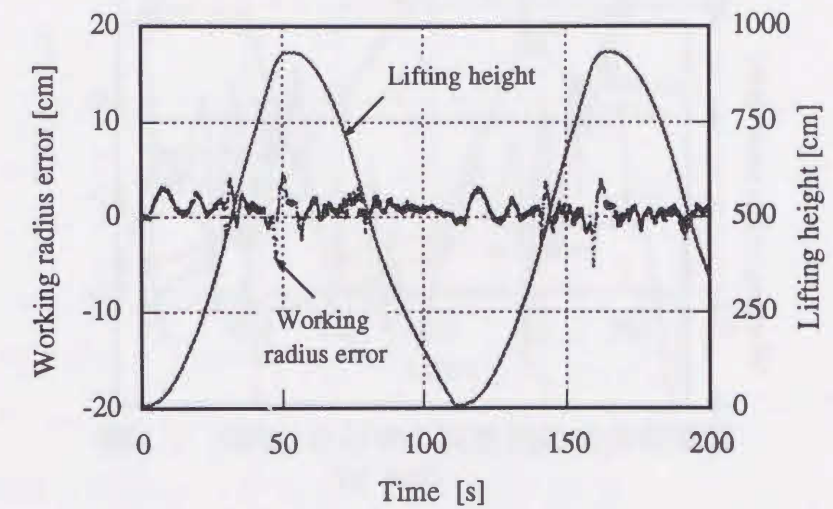
(a) Responses of working platform



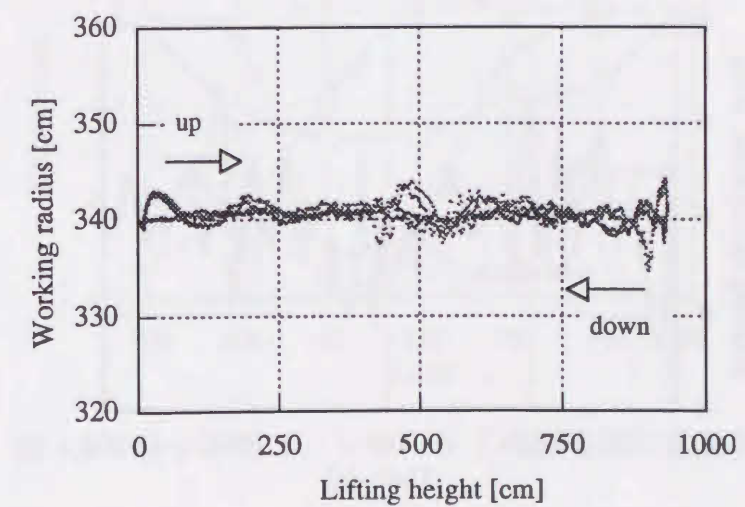
(b) Locus of working platform

図4.3 PIコントローラによる垂直移動結果

ルールを示す。図4.7はSTFCのみで制御し、ブーム長を540[cm]または813[cm]に固定して垂直移動に相当する目標値を与えた場合の起伏軸の伏せ側のルールであり、STFCの規範速度、規範加速度に対するルールはともにブーム長に応じて変動している。図4.8の非干渉化コントローラを有する場合では、STFCの各ルールが



(a) Responses of working platform



(b) Locus of working platform

図4.4 非干渉化制御システムによる垂直移動結果



小さく抑えられており,干渉する相手軸の影響が大きくなるに従って非干渉化コントローラのルールが大きくなることで相手軸の影響を補償していることが分かる.

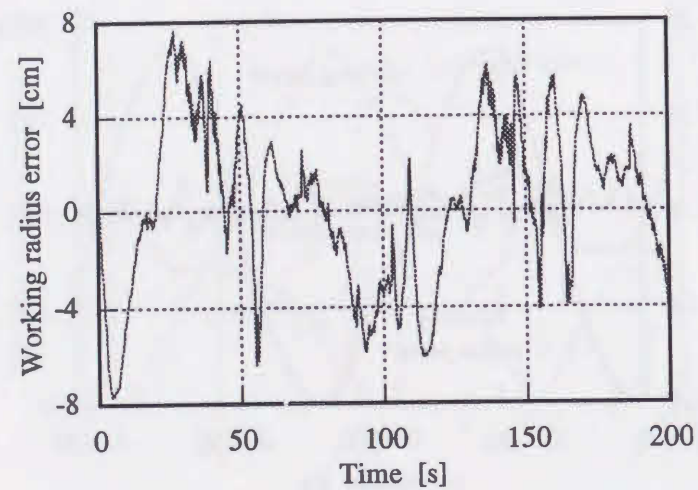


図 4.5 STFC のみによる作業半径誤差応答

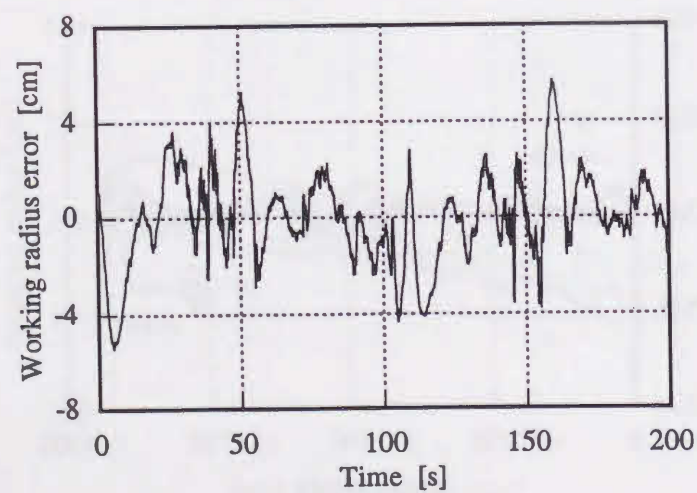


図 4.6 非干渉化コントローラによる作業半径誤差応答

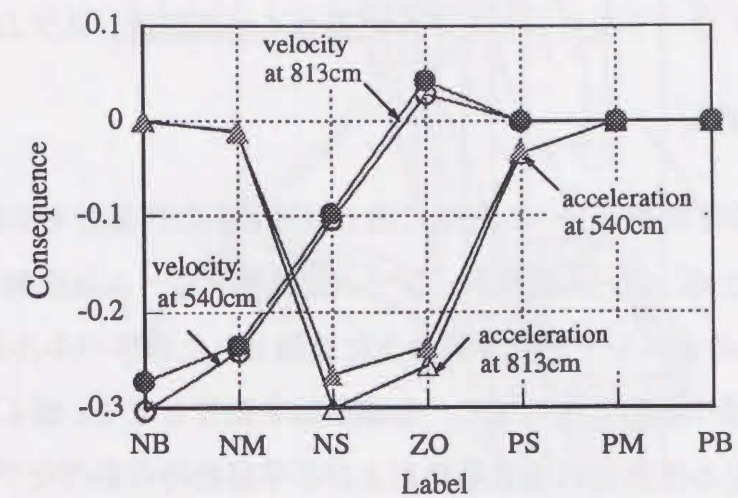


図 4.7 STFC のみでの調整後の後件部変数

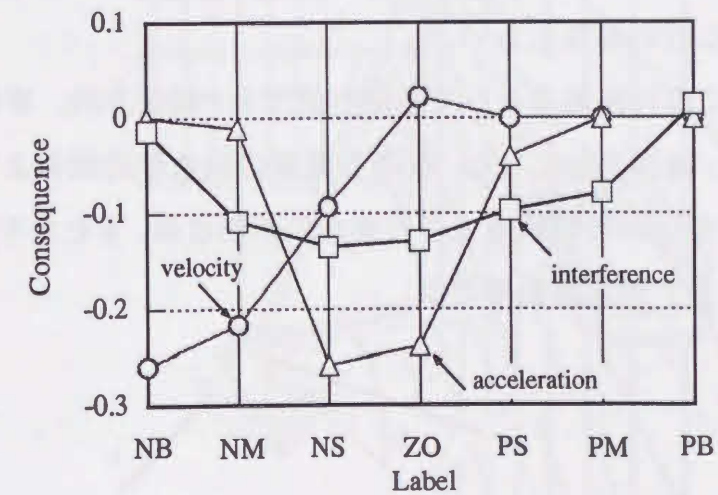


図 4.8 非干渉化コントローラでの調整後の後件部変数



### 4.3 モデルに基づく協調制御システム

伸縮ブーム型高所作業車の作業台の垂直・水平移動制御では、幾何学的関係から経路制御の性能の判定指標が得られる。そこで、協調動作特性を改善するもうひとつのアプローチとして、積極的協調の観点から経路制御の性能の判定指標をもとにした協調動作コントローラを用いたモデルに基づく協調制御システムを提案する。

#### 4.3.1 協調動作モデル

伸縮ブーム型高所作業車はブーム先端に取り付けられた作業台を空間内で任意の位置へ移動させるため、ブーム伸縮軸、ブーム起伏軸、ブーム旋回軸の3つの駆動軸を持つ。作業台上のオペレータは作業台上に設置された操作パネル内のジョイスティックレバーを操作することにより、各駆動軸を動作させる。図4.9は伸縮ブーム型高所作業車による作業台の垂直移動および水平移動時の動作モデルである。作業台垂直移動の目的は作業半径内の任意の点 $p(x,y)$ 上で水平面内のずれなく垂直に作業台を移動させることであり、起伏角 $\theta$ にあわせてブーム長 $l$ を調整する必要がある。また、水平移動は、地面から作業台までの高さを一定に保ちつつ直線的に作業台を移動させることであり、ブーム旋回角 $\phi$ にあわせてブーム長 $l$ および起伏角 $\theta$ をそれぞれ制御しなければならない。

図4.9に示すように直行座標系として車輻右側方を $x$ 軸正方向、車輻前方を $y$ 軸正方向、鉛直上方を $z$ 軸正方向にとる。高所作業車の幾何学的関係より、 $x_0, y_0, z_0$ をデカルト座標系で表した目標軌道上の作業台の初期位置、 $\phi$ を水平移動方向と $y$ 軸とのなす角とすると、垂直移動時では

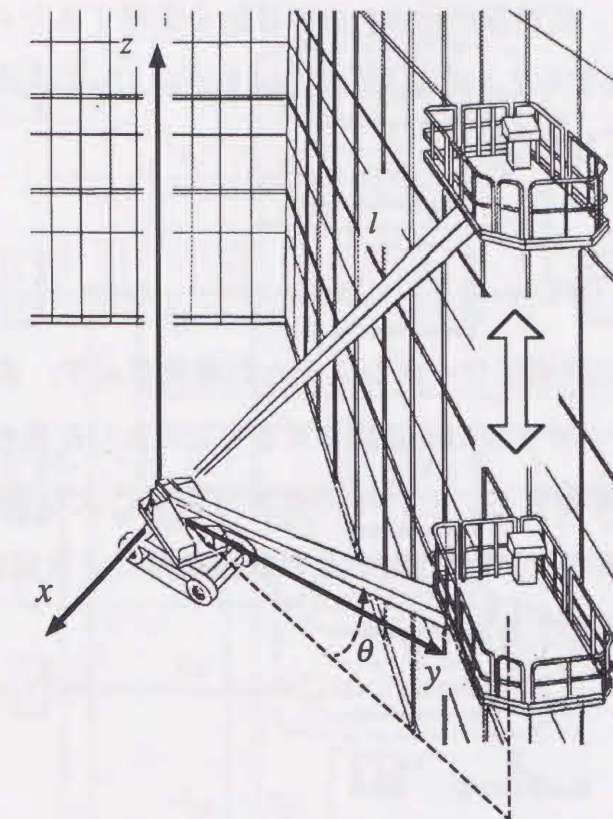
$$l = \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\cos \theta} \quad (4.7)$$

$$\phi = \text{constant} \quad (4.8)$$

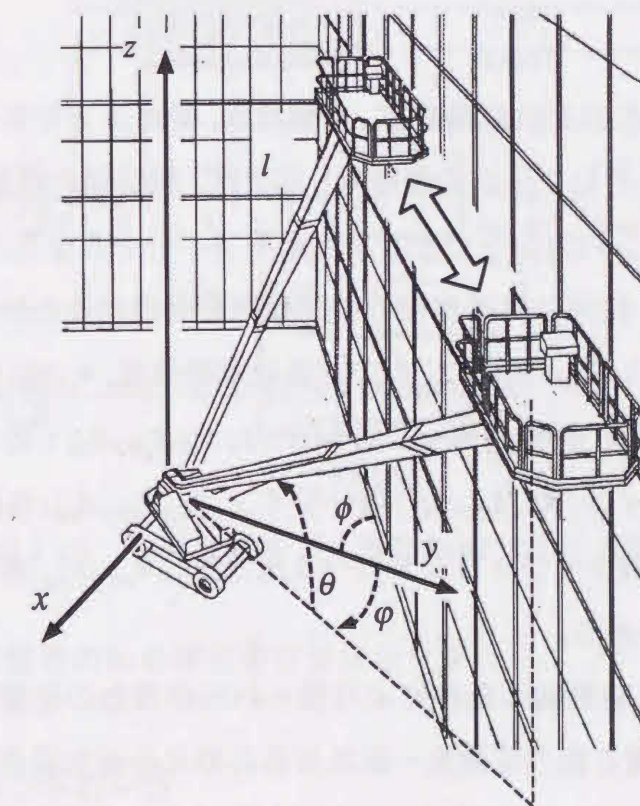
となり、水平移動時では

$$l \sin \theta = z_0 \quad (4.9)$$

$$l \cos \theta = \frac{y_0 \tan \phi - x_0}{\cos \phi \tan \phi - \sin \phi} \quad (4.10)$$



(a) Vertical movement



(b) Horizontal movement

図4.9 協調動作モデル



が成立する。すなわち、高精度の垂直・水平移動を実現するために、各軸出力は各軸規範位置信号に追従することに優先して、(4.7)～(4.10)式の関係性を常に満足するように制御されなければならない。

#### 4.3.2 制御システム

図4.10に提案する協調油圧サーボシステムの構成を示す。まず、オペレータは作業台上でジョイスティックレバーを操作することにより作業台の移動速度ベクトル  $V_{xyz} = [v_x, v_y, v_z]^T$  を指令する。それらの信号は次式により各駆動軸の規範速度  $V_{l\theta\phi} = [v_l, v_\theta, v_\phi]^T$  に変換され、数値積分および数値微分により規範位置  $l, \theta, \phi$  と規範加速度  $\alpha_l, \alpha_\theta, \alpha_\phi$  を算出する。

$$V_{l\theta\phi} = F V_{xyz} \quad (4.11)$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos\theta \sin\phi & \cos\theta \cos\phi & \sin\theta \\ \sin\theta \sin\phi & \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \\ -\frac{l}{\cos\phi} & -\frac{l}{\sin\phi} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ここで添字  $x, y, z$  はそれぞれ車軸右方、車軸前方、鉛直上方を正とする座標軸を示し、添字  $l, \theta, \phi$  はそれぞれブームの伸縮軸、起伏軸、旋回軸の各駆動軸成分を示す。各駆動軸は固定ゲインPIコントローラからなるフィードバックループにSTFCが付加されている。また、軸間には高精度の協調動作を実現するための協調動作コントローラが設けられている。図中、 $l, \theta, \phi$ ：各軸規範位置、 $v_l, v_\theta, v_\phi$ ：各軸規範速度、 $\alpha_l, \alpha_\theta, \alpha_\phi$ ：各軸規範加速度、 $l, \theta, \phi$ ：各軸出力、 $e_{fl}, e_{f\theta}, e_{f\phi}$ ：各軸追従誤差信号、 $k_{pl}, k_{p\theta}, k_{p\phi}$ ：比例ゲイン、 $k_{il}, k_{i\theta}, k_{i\phi}$ ：積分ゲイン、 $e_{cl}, e_{c\theta}, e_{c\phi}$ ：各軸PIコントローラ出力、 $e_{al}, e_{a\theta}, e_{a\phi}$ ：各軸ファジィコントローラ出力、 $e_{pl}, e_{p\theta}, e_{p\phi}$ ：各軸への協調動作コントローラの出力である。

STFCの目的は、各駆動軸の動作により得られる作業台の位置を規範軌道上に保ちつつ、各軸規範位置と出力位置を一致させるために必要な操作量をファジィ推論により求めることである。そのためファジィコントローラへの入力信号は、規範速度および規範加速度を用いている。ファジィ制御ルールは各軸の追従誤差信号と軸

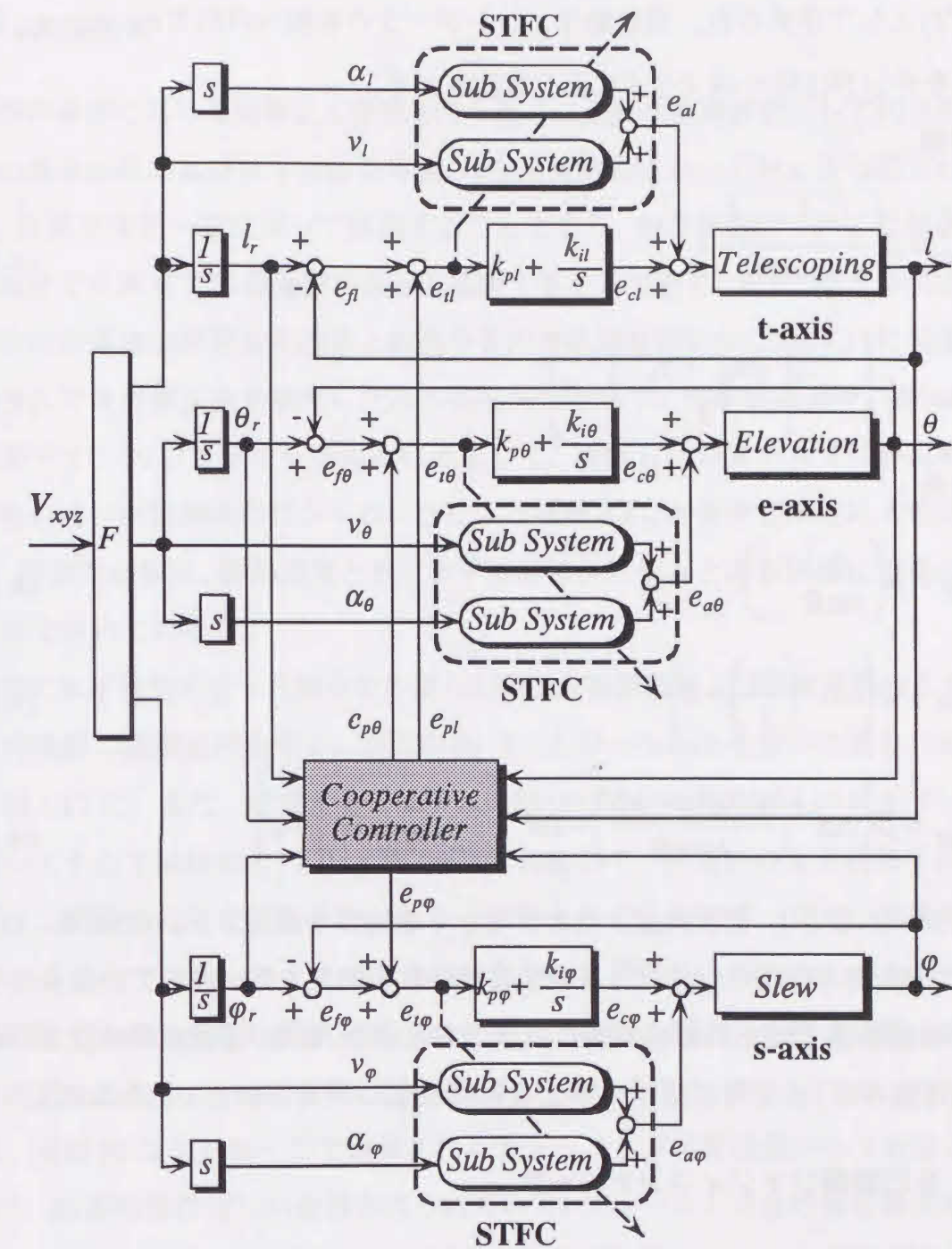


図4.10 モデルに基づく協調制御システム構成

間の協調動作誤差信号の和を零収束させるようチューニングされる。

#### 4.3.3 協調動作コントローラ

駆動軸間の協調動作誤差信号は(4.7)～(4.10)式で表される規範軌道からの作業



台のずれとして求められ、協調動作コントローラの各軸への出力  $e_{pl}$ ,  $e_{p\theta}$ ,  $e_{p\phi}$  はゲイン  $\beta$  を介し (4.13) ~ (4.17) 式により算出される。

垂直移動；

$$e_{pl} = \beta \left( \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\cos \theta} - l \right) \quad (4.13)$$

$$e_{p\theta} = \beta \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{l} \right) - \theta \right\} \quad (4.14)$$

水平移動；

$$e_{pl} = \beta \left( \frac{z_0}{\sin \theta} - l \right) \quad (4.15)$$

$$e_{p\theta} = \beta \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{z_0}{l} \right) - \theta \right\} \quad (4.16)$$

$$e_{p\phi} = \beta \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{y_0 \tan \phi - x_0}{l \cos \theta} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \phi + 1}} \right) - \phi \right\} \quad (4.17)$$

ここでブーム長さ  $l$ 、起伏角度  $\theta$  はオフセットを持つため、 $l = \theta \neq 0$  である。(4.13) ~ (4.17) 式から明らかなように、各軸出力が各軸規範入力に一致していなくても作業台が目標軌道上にあれば協調動作誤差は零となる。また、協調動作の度合いはゲイン  $\beta$  に依存し、 $\beta$  を零に設定すると各軸は独立に制御されることとなる。

#### 4.3.4 自己調整ファジィコントローラ

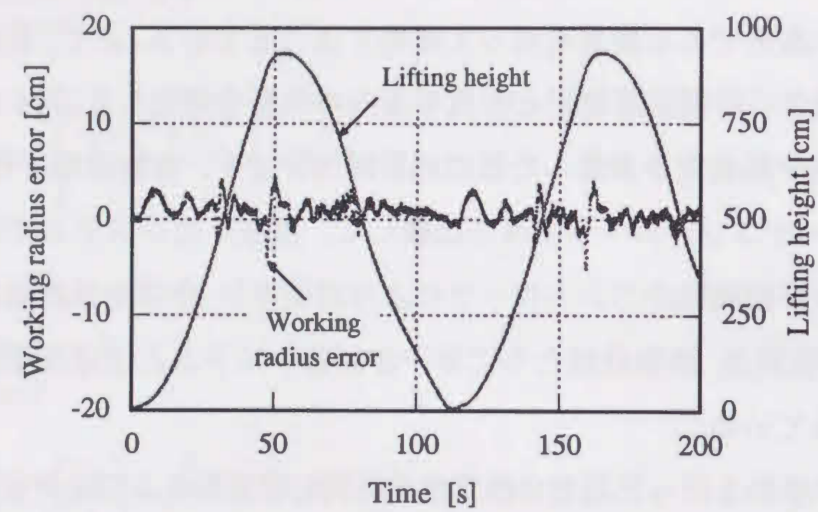
本節で用いる STFC も非干渉制御システムで用いた STFC と同じ制御ルール、推論方法であり、(4.4) ~ (4.6) 式に示したとおりである。しかしながら、非干渉制御システムで用いた STFC では追従誤差信号のみをもとにファジィ制御ルールのチューニングを行ったのに対し、ここでは各軸の追従誤差信号と幾何学的な協調動作モデルから算出された軸間の協調動作誤差信号との和を零収束させるようチューニングする。

#### 4.3.5 実測結果

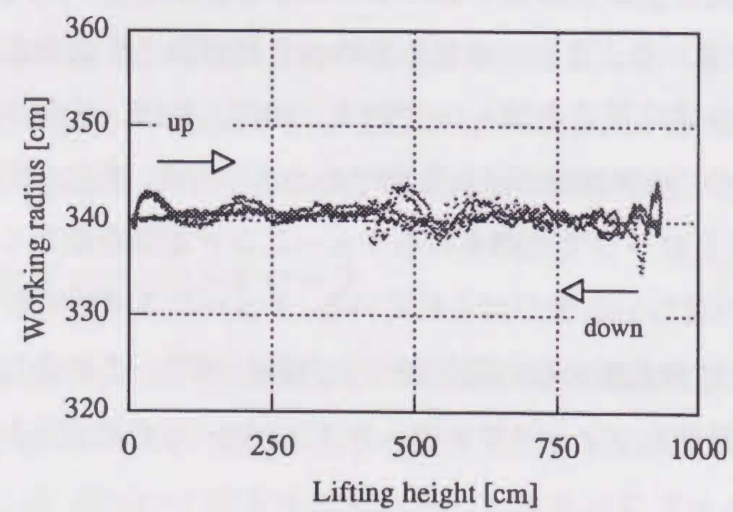
高所作業車において効率よく作業を行うために必要な直線移動として代表的な作業台の垂直移動および水平移動を実測した。垂直移動において何よりも望まれることは、作業半径を一定に保って移動することであり、水平移動については地面から作業台までの高さである揚程を保って移動することである。まず、垂直移動を行った場合の作業台の時間応答波形と鉛直平面内の軌跡を測定した。図4.11に提案したシステムで後件部変数を調整した後の応答特性を示す。実験結果より、図4.3にした固定ゲイン PI コントローラのみと比較して、提案したシステムでは各駆動軸の動特性の違いが協調動作コントローラにより補償され、作業半径誤差は大幅に改善され、作業半径誤差、移動速度ともに非干渉制御システムとほぼ同等に協調化および高速化されている。

同様に水平移動を行った場合の作業台の時間応答波形および鉛直平面内と水平平面内の軌跡の実測結果を示す。従来の PI コントローラのみを用いた場合の応答特性を図4.12に、また、提案するシステムの場合の応答特性を図4.13に示す。提案するシステムでは従来の PI コントローラと比較して、作業台の上下運動を約49%以下に、作業台の左右運動を約18%以下に抑えることができ、また、移動速度も約30%高速化できている。また、水平移動時の目標経路と作業台との水平方向および垂直方向の二乗平均誤差を図4.14に示す。伸縮、起伏、旋回の各軸の応答は個々に異なるものの、協調制御の評価指標である水平方向、垂直方向の二乗平均誤差は、ほぼ PI コントローラで制御されるチューニング初期段階から2桁ほど小さくなり、応答特性の著しい改善が図られている。チューニング後の後件部変数の一例として、図4.15に伸縮軸の後件部変数を方向別に示す。これより伸び方向、縮み方向で異なる非線形なフィードフォワードコントローラが構成されたことがわかる。



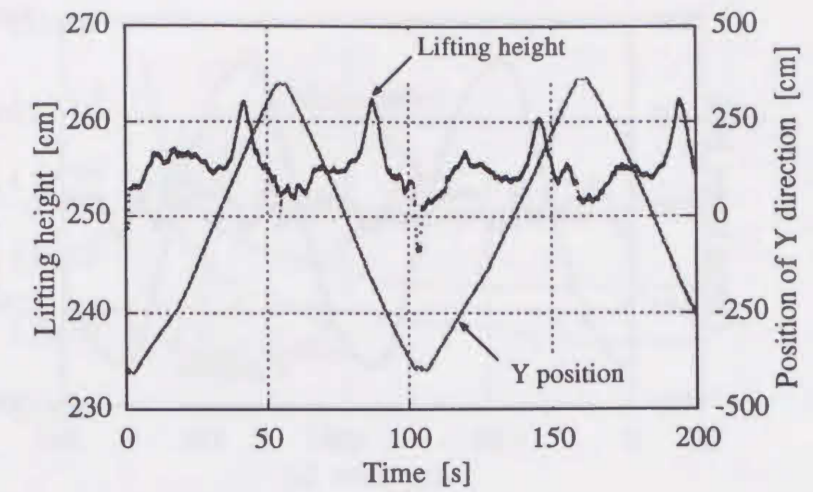


(a) Responses of working platform

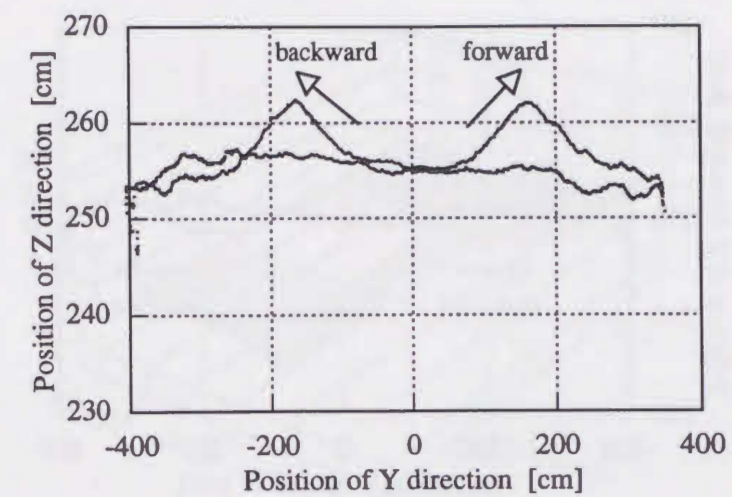


(b) Locus of working platform

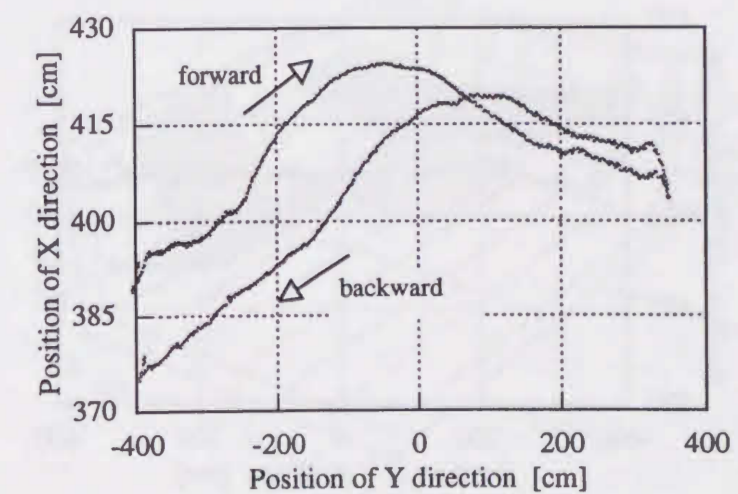
図 4.11 モデルに基づく協調制御システムによる垂直移動結果



(a) Responses of working platform



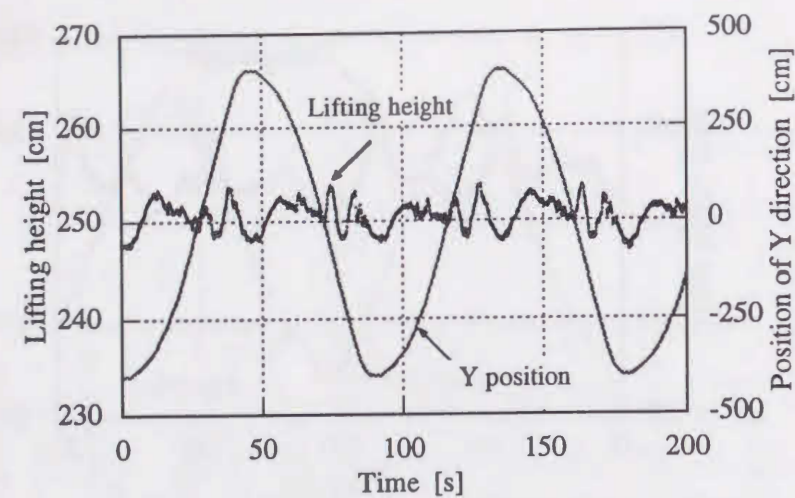
(b) Locus of working platform of vertical plane



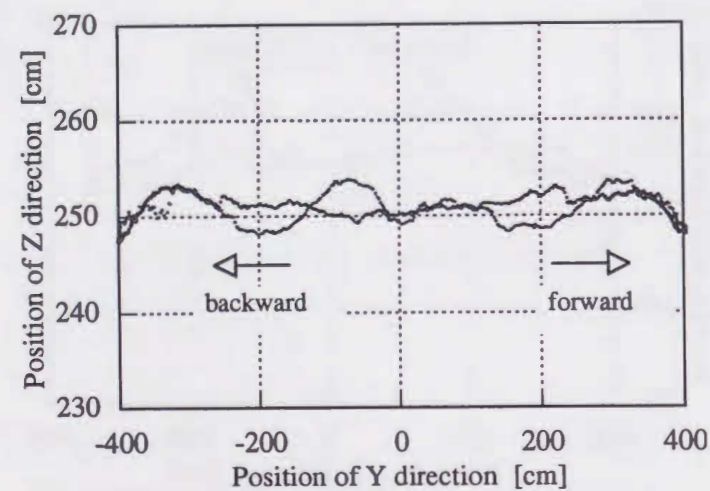
(c) Locus of working platform of horizontal plane

図 4.12 PI コントローラによる水平移動結果

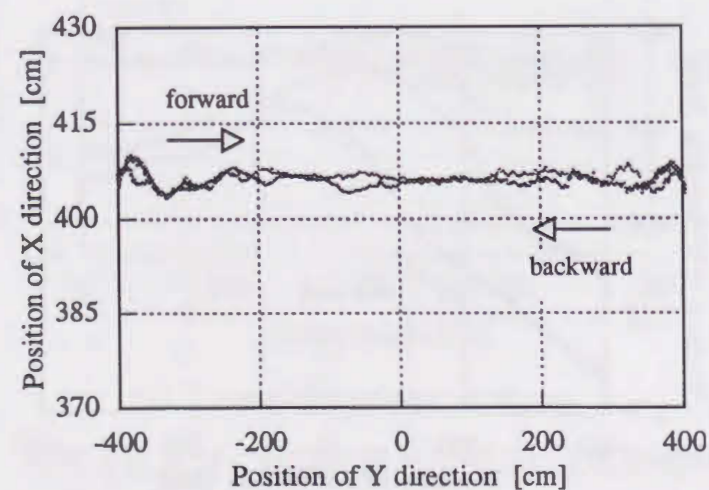




(a) Responses of working platform



(b) Locus of working platform of vertical plane



(c) Locus of working platform of horizontal plane

図 4.13 モデルに基づく協調制御システムによる水平移動結果

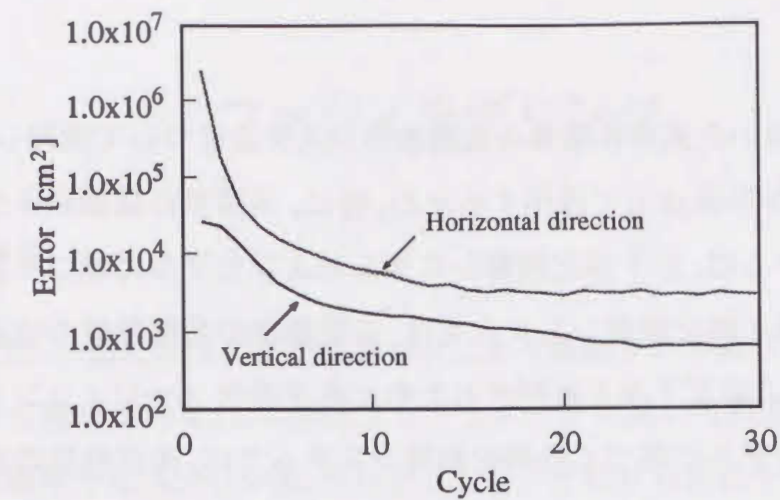
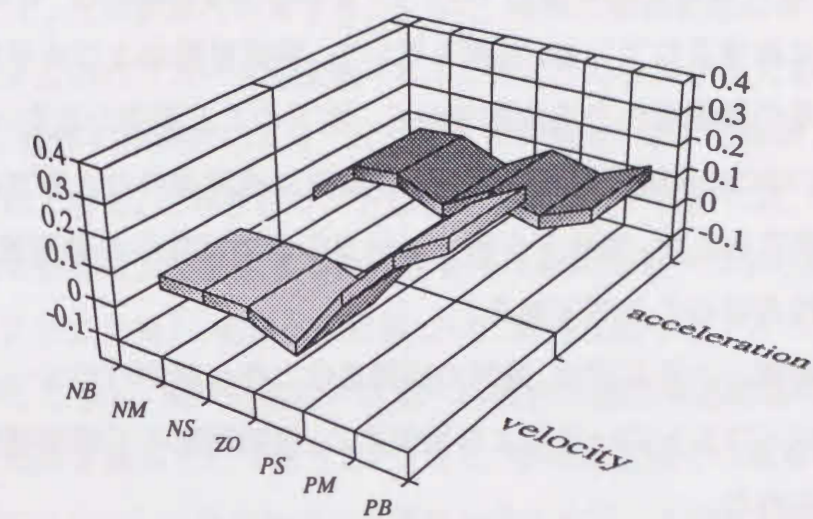
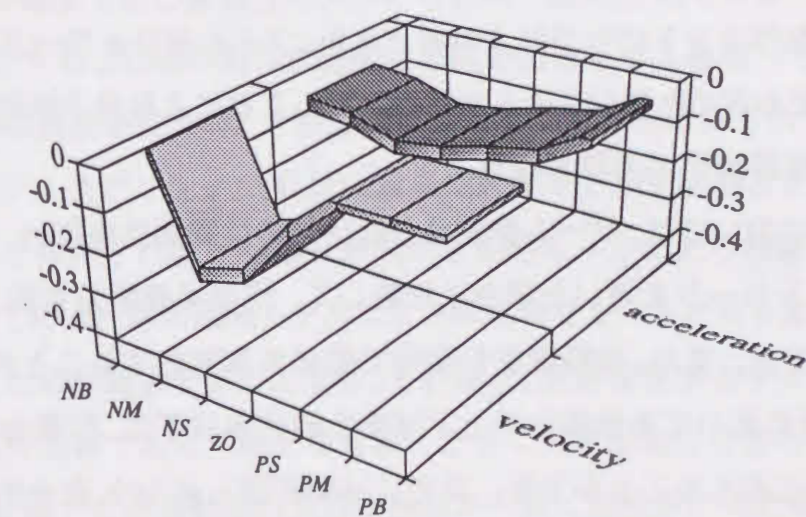


図 4.14 二乗平均誤差の応答



(a) tension direcdtion



(b) shrink direcdtion

図 4.15 伸縮軸の調整後の後件部変数



#### 4.4 まとめ

ファジィ制御を用いた高所作業車の協調動作システムについて検討した。高所作業車はオペレータが作業台上で操作するため、特に、高精度の協調動作が要求される。提案したシステムは、非干渉化制御システムおよびモデルに基づく協調化制御システムである。非干渉化制御システムでは、各駆動軸の追従特性の改善のためにSTFCを、駆動軸間の相互干渉を抑制するために非干渉化ファジィコントローラが設けられている。モデルに基づく協調化制御システムでは、追従特性の改善に加え協調化特性の改善のために幾何学的な協調動作モデルから算出された軸間の協調動作誤差信号を用いた協調動作コントローラが導入されており、各軸のSTFCのチューニングに加味されている。実機を用いて、垂直移動および水平移動を対象とした高所作業車の協調動作の実測結果から、以下のことが明かとなった。

- (1) 提案したSTFCは各軸の規範速度および規範加速度信号の大きさに応じて適切にゲイン調整するため、油圧アクチュエータの非対称性や非線形性を補償し、優れた追従特性を得ることができる。
  - (2) 非干渉化制御システムでは、機械の姿勢変化に伴う制御パラメータの変動が非干渉化ファジィコントローラにより補償され、駆動軸間の干渉が抑制された協調動作が実現された。
  - (3) モデルに基づく協調制御システムでは、協調動作モデルによる目標軌道からのずれが協調動作コントローラにより補正され、フィードフォワードパス内に駆動軸間の特性差も含めた逆システムが構築されることにより非干渉制御システム同様に良好な協調動作が実現された。
  - (4) 垂直移動においては、ブーム伸縮軸と起伏軸の協調動作を行い、従来の固定ゲインPIコントローラを用いた場合に比較して、作業半径誤差を約37%以下に抑えることができ、また、移動速度も平均で約40%高速化することができた。同様に、水平移動においても作業台の上下運動を約49%以下に、作業台の左右運動を約18%以下に抑えることができ、また、移動速度も約30%高速化できている。
- 以上より、提案した高所作業車の協調動作システムは、操作の自動化・簡略化を図りオペレータの負担を軽減する実用的で高精度なシステムであると思われる。

## 第5章

### ファジィモデリング

#### 5.1 まえがき

建設機械は、一般に油圧アクチュエータにより駆動される複数の駆動軸と複雑な機械構造から構成される。この油圧アクチュエータに用いられる油圧機器は、油圧制御弁の不感帯やヒステリシス、片ロッドシリンダの非対称性や摩擦など強い非線形性を有している。また、機械構造物には各部連結部のガタ、ギヤのバックラッシュや摩擦といった非線形性を有する。さらに、機械の姿勢変化に伴って重力の影響を受けシステムのパラメータが変動する。このようなシステムだからこそ、自動化、高機能化、操作の簡略化により‘人にやさしい機械’とする制御コントローラの開発が望まれている。これらのコントローラの効率よい設計には、各軸の非線形性を含み機械の姿勢により変化する動特性を持つ実用的モデルが必要である。

こうしたシステムに対し、物理法則に基づいた精密な数学モデルの導出が検討されている<sup>143)-152)</sup>。しかし、油圧回路内の外部への漏れや構造物連結部のガタを無視、分布定数系を集中定数系として扱うこと、また、平衡点近傍での線形化などの数々の仮定を設けて近似化した構成要素を多数組み合わせるシステムを構築しなければならず、非線形要素を含む厳密なモデルの導出は一般に困難である。そのため従来は、上述の仮定をもとに基準動作点近傍での線形近似モデルを用いており、広い動作範囲では誤差が拡大し、十分な精度を有するモデルは得られていない。

一方、ファジィモデリング<sup>153)</sup>は推論対象の数学モデルを必要とせず、人の知識や経験をもとに作成されるif～then形式の言語的ルールにより推論を行い、その推論値はすべてのルールの回帰モデルによる推論値をルールの適合度により荷重平均して求めるため非線形モデルとなる。それゆえ、厳密な数学モデルを必要とせずモデルの導出が困難である非線形な対象にとって大きな魅力である。しかしながら、ファジィ推論では推論結果の良否が推論ルールに左右されるため、適切な推論ルールの設定が不可欠である。そのため通常は熟練者のもとで推論結果を評価し、ファジィ推論における推論ルールの調整を設計者自身により反復的に行わなくては



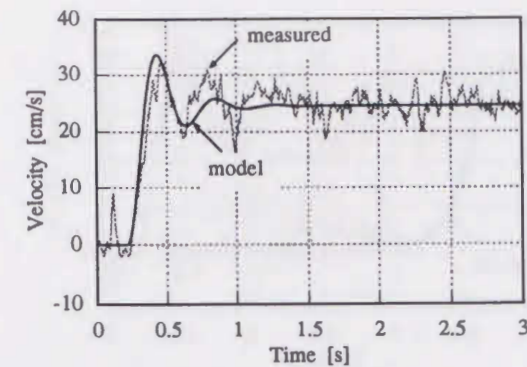
ならない。さらに、入力空間の次元やファジィ分割数が多くなれば熟練者といえども推論ルールの設定は容易ではない。そこで、推論ルールを自動的に調整する種々のモデリング方法が提案されている<sup>154)-157)</sup>。その中で、3, 4章で用いた推論ルールの後件部を調整する自己調整ファジィ推論は、簡単なアルゴリズムで追従特性の改善に有効であることを示した<sup>158)-160)</sup>。本章では、この自己調整ファジィ推論を用い、高所作業車のブーム伸縮・起伏軸について、入出力信号の実測結果に基づくファジィモデルの構築手法について述べ、各軸の非線形性および姿勢変化に伴う動特性の変化を考慮した実用的なモデルの導出について検討している。

## 5.2 線形近似モデル

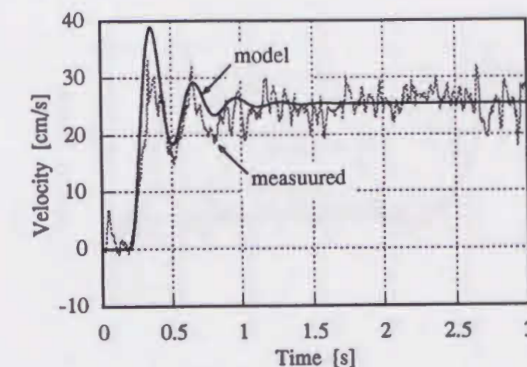
2章で述べたようにシステムは、油圧機器や機械の機構に起因する非線形性と機械の姿勢変化によるパラメータ変動など、その特性は非線形性の強いものである。しかしながら、油圧シリンダは一般に一次遅れ要素と積分器で近似できることが知られており<sup>161)</sup>、油圧系に加え機械構造物を含む高所作業車では、経験的に二次遅れ要素と積分器で近似できることが分かっている。しかしながら、機械の姿勢変化に伴いその動特性は変動する。そこで、顕著な特性の違いを示す機械の姿勢条件としてブーム長の長短 (Long, Short)、ブーム起伏角の高低 (Up, Down) の組合せによる4つ動作モード (LU, LD, SU, SD) のおいて、供試高所作業車のステップ応答を実測し、各姿勢で時刻  $t$  における入力  $u^l, u^\theta$  から位置出力  $y^l, y^\theta$  までを(5.1)式に示す線形モデルとして近似して求めた。

$$\hat{y}_{jk}^q(t) = \frac{\omega_{jk}^{q2} k_{jk}^q}{p(p^2 + 2\zeta_{jk}^q \omega_{jk}^q p + \omega_{jk}^{q2})} u^q(t) \quad (5.1)$$

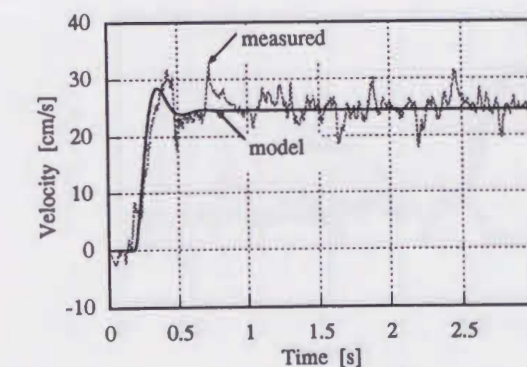
ここで、 $p$ は微分演算子を、添字  $q=l, \theta$ は伸縮、起伏軸を示し、 $j, k$ はLU, LD, SU, SDの4つの動作モードを示す。なお、各軸とも操作方向により特性が異なるため、モデルは操作方向も考慮して求めた。各動作モードでの伸縮軸、起伏軸の実測値  $y^l, y^\theta$ と近似線形モデルの応答  $\hat{y}^l, \hat{y}^\theta$ を動作方向別に図5.1～図5.4に示す。システムの持つむだ時間や実測値に含まれる高周波ノイズを無視すれば、ほぼ二次遅れで



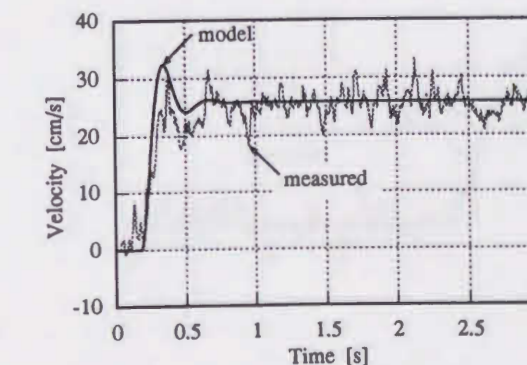
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation



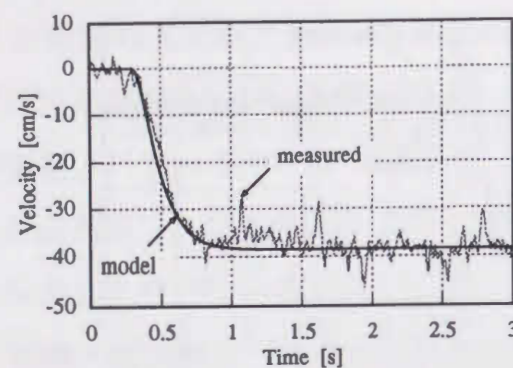
(c) long boom and low elevation angle situation



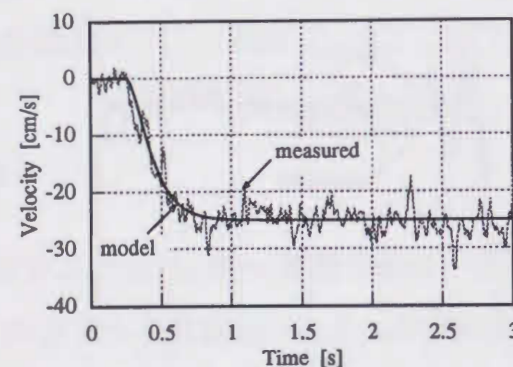
(d) short boom and low elevation angle situation

図5.1 伸縮軸伸び方向ステップ応答

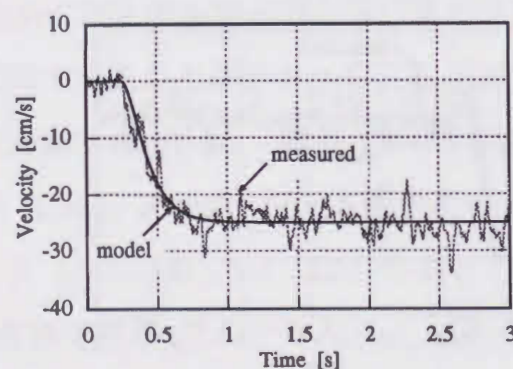




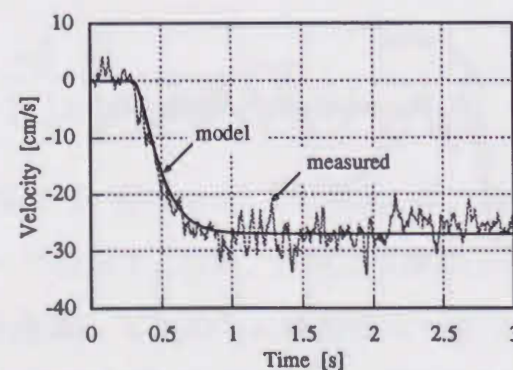
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation

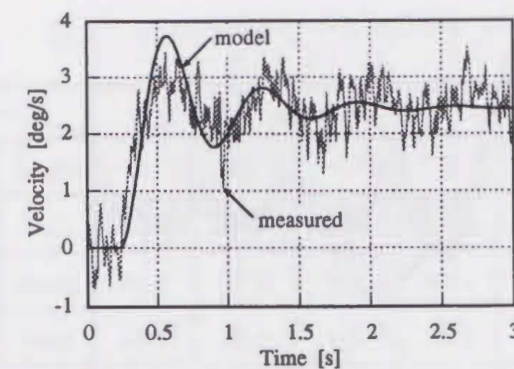


(c) long boom and low elevation angle situation

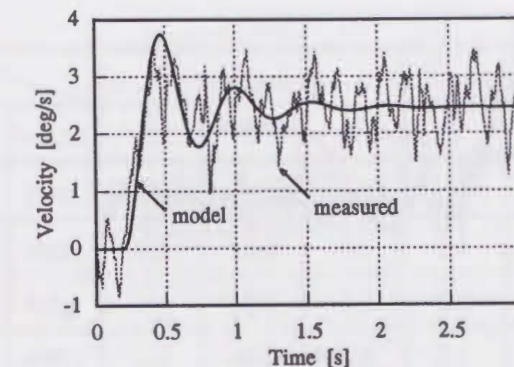


(d) short boom and low elevation angle situation

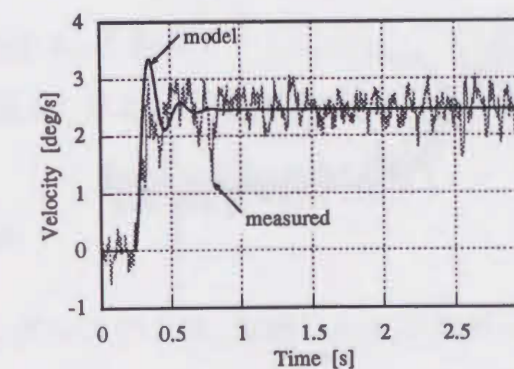
図 5.2 伸縮軸縮み方向ステップ応答



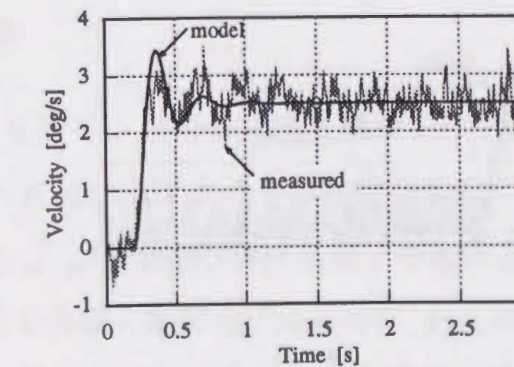
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation



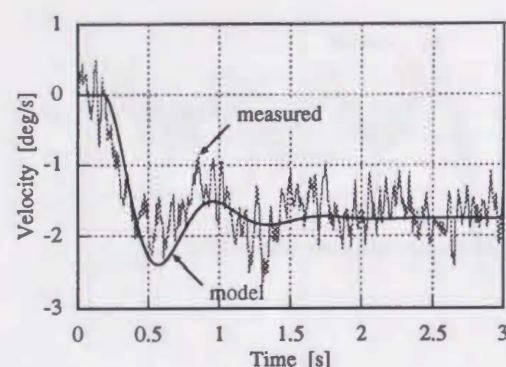
(c) long boom and low elevation angle situation



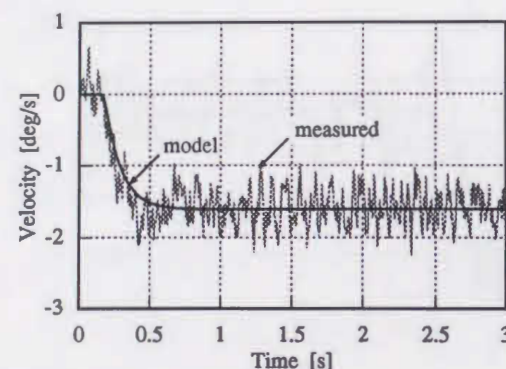
(d) short boom and low elevation angle situation

図 5.3 起伏軸起こし方向ステップ応答

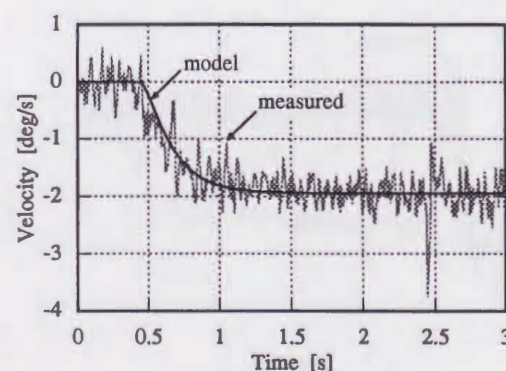




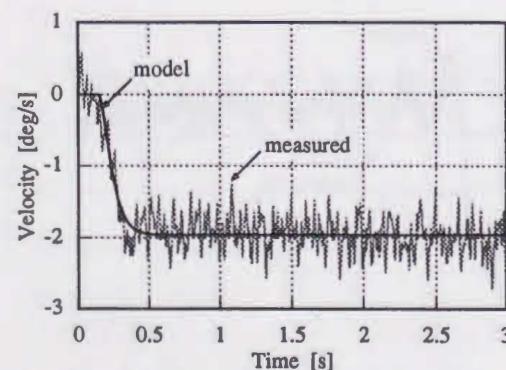
(a) long boom and high elevation angle situation



(b) short boom and high elevation angle situation



(c) long boom and low elevation angle situation



(d) short boom and low elevation angle situation

図 5.4 起伏軸伏せ方向ステップ応答

表 1 近似線形モデルのパラメータ

angle	length	Telescopic tension			Telescopic shrink		
		$k$	$\omega$	$\zeta$	$k$	$\omega$	$\zeta$
high	long	35.0	15.7	0.3	55.0	10.0	1.0
high	short	36.4	21.0	0.2	57.1	10.0	1.0
low	long	35.7	21.0	0.5	35.7	10.0	1.0
low	short	37.1	21.0	0.4	38.6	10.0	1.0

angle	length	Elevation up			Elevation down		
		$k$	$\omega$	$\zeta$	$k$	$\omega$	$\zeta$
high	long	3.6	9.5	0.2	2.5	8.5	0.3
high	short	3.6	12.0	0.2	2.4	23.1	1.5
low	long	3.6	30.0	0.3	2.8	10.0	1.2
low	short	3.6	20.0	0.3	2.9	20.0	1.0

近似できることがわかる。各動作モードにおいて二次遅れ要素で線形近似した減衰係数 $\zeta_{jk}^q$ 、固有振動数 $\omega_{jk}^q$ およびゲイン $k_{jk}^q$ を表1に示す。

### 5.3 ファジィモデル

提案するモデリングシステムは、実測した入出力データからファジィモデルを構築し、任意の入力に対しその出力を推論するものである。

#### 5.3.1 システム構成

図5.5にファジィモデリングのシステム構成を示す。前述したように、高所作業車はブーム長やブーム起伏角によりその特性が変動する。そこで、各駆動軸への入力である制御弁指令 $u'$ 、 $u^\theta$ に加え、ブーム長 $y'$ や起伏角 $y^\theta$ も入力とし、(5.1)式に示した各モードにおける各軸の線形モデル出力 $\hat{y}'$ 、 $\hat{y}^\theta$ を用いて推論誤差 $e'$ 、 $e^\theta$ を零収束させるよう推論ルールを自動調整する自己調整ファジィ推論器(Self-Tuning Fuzzy Estimator)を構成する。



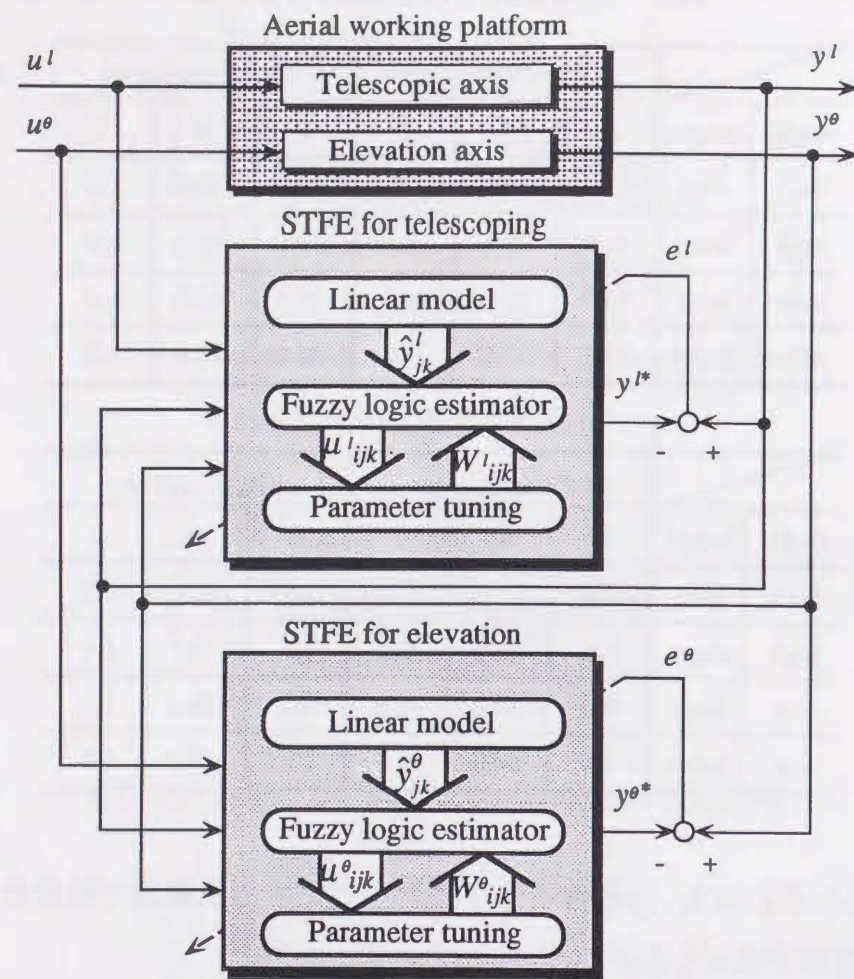


図 5.5 システム構成

### 5.3.2 推論アルゴリズム

各軸のファジィルールは次式のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } u^q(t) \text{ is } A_i^q \text{ and } y^l(t) \text{ is } B_L^q \text{ and } y^\theta(t) \text{ is } C_U^q \text{ then } \hat{y}_{LU}^q(t) \text{ is } W_{iLU}^q(t). \\ \text{if } u^q(t) \text{ is } A_i^q \text{ and } y^l(t) \text{ is } B_L^q \text{ and } y^\theta(t) \text{ is } C_D^q \text{ then } \hat{y}_{LD}^q(t) \text{ is } W_{iLD}^q(t). \\ \text{if } u^q(t) \text{ is } A_i^q \text{ and } y^l(t) \text{ is } B_S^q \text{ and } y^\theta(t) \text{ is } C_U^q \text{ then } \hat{y}_{SU}^q(t) \text{ is } W_{iSU}^q(t). \\ \text{if } u^q(t) \text{ is } A_i^q \text{ and } y^l(t) \text{ is } B_S^q \text{ and } y^\theta(t) \text{ is } C_D^q \text{ then } \hat{y}_{SD}^q(t) \text{ is } W_{iSD}^q(t). \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

ここで、添字  $L, S$  はブーム長の長短を示し、 $U, D$  はブーム起伏角の高低を示す。 $W_{ijk}^q$  はシングルトンの後件部変数である。 $A_i^q, B_L^q, B_S^q, C_U^q, C_D^q$  はファジィ集合であり、2章で述べたように制御弁は強い非線形性を有することから制御弁指令に対しては

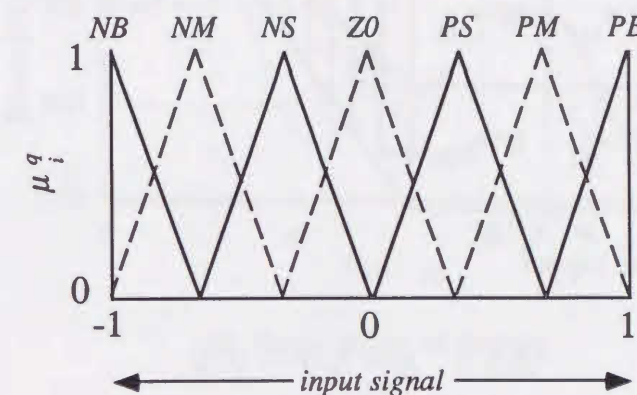
NB(Negative Big) ~ PB(Positive Big) の7ラベルを、ブーム長、ブーム起伏角に対しては S(Small), B(Big) の2ラベルをそれぞれに準備する。また、各々の入力制御弁の最大開度や機械の動作範囲といった能力を考慮して正規化し、図5.6に示すメンバシップ関数によりファジィ化する。したがって、推論ルールの後件部変数は図5.7に示すルールテーブルを持つこととなり、各軸の推論値  $y^{q*}$  は荷重平均により次式で与えられる。

$$y^{q*}(t) = \frac{\sum \mu_{ijk}^q(t) W_{ijk}^q(t) \hat{y}_{ijk}^q(t)}{\sum \mu_{ijk}^q(t)} \quad (5.3)$$

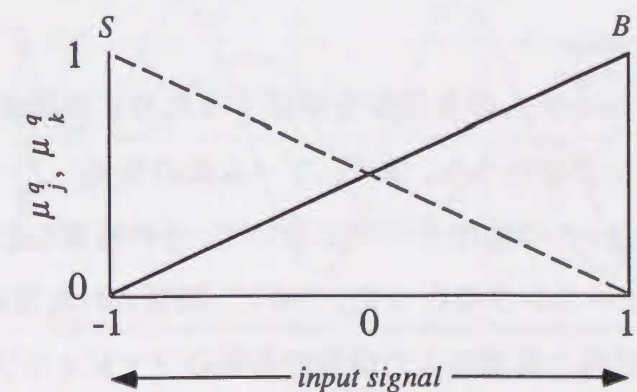
ここで、 $\mu_{ijk}^q(t)$  は選択されたルールのグレードであり、次式で表される。

$$\mu_{ijk}^q(t) = \mu_i^q(t) \mu_j^q(t) \mu_k^q(t) \quad (5.4)$$

ここで、 $\mu_i^q(t), \mu_j^q(t), \mu_k^q(t)$  は各軸入力信号  $u^q(t), y^l(t), y^\theta(t)$  のグレードである。ま



(a) Membership functions for reference of flow control valve



(b) Membership functions for position of each axis

図 5.6 メンバシップ関数



た、図5.7に示す推論ルールの後件部変数  $W_{ijk}^q(t)$  は推定誤差  $e^q(t)$  を零収束するよう最急降下法により求められる。

なお、推論ルールのチューニング時には、入力信号として各軸の実測値  $y^l, y^{\theta}$  を用いる。チューニングが終了した段階でモデル出力  $y_i^*, y_{\theta}^*$  は  $y^l, y^{\theta}$  と一致するので、推論ルールを固定し、入力信号  $y^l, y^{\theta}$  の代わりに  $y_i^*, y_{\theta}^*$  を用いて任意の入力に対するモデル出力を求める。

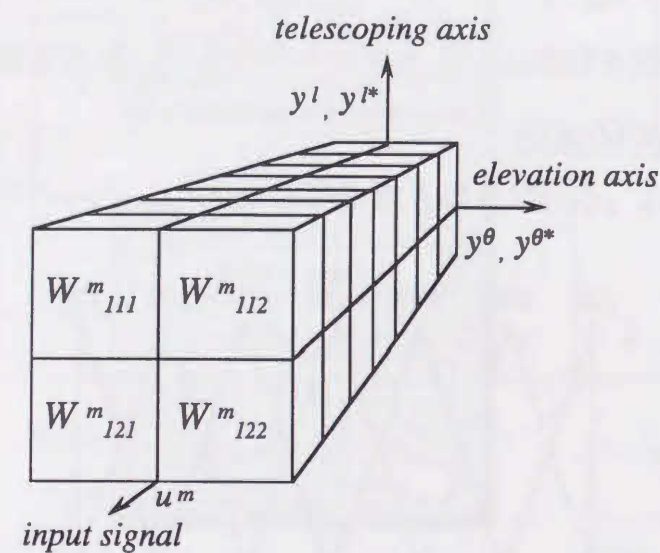


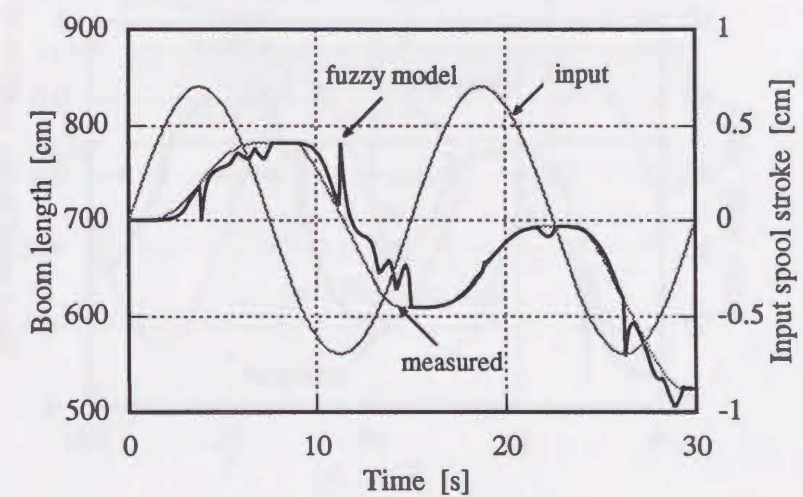
図 5.7 ルールテーブル

#### 5.4 実測結果

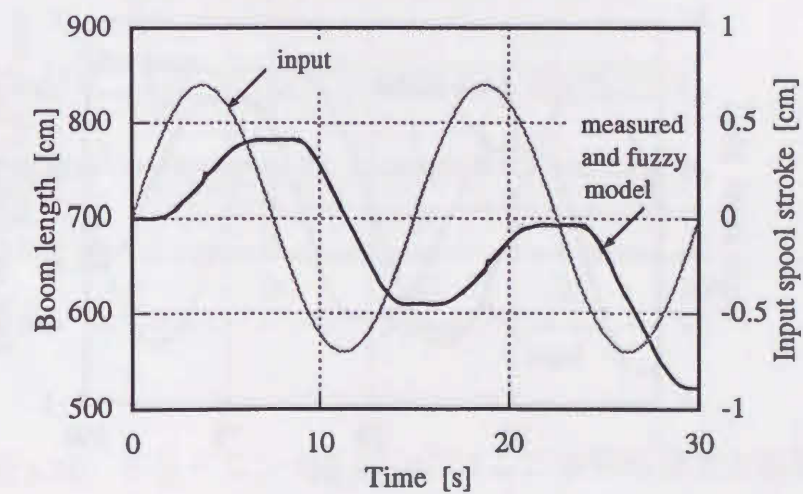
提案するモデリングシステムの有効性を確認するために供試高所作業車の実測データを用いてモデリングを行った。まず、ブーム長の長短、ブーム起伏角の高低により表される特徴的な4つの動作モードにおいて、その時得られた実測データを用いて各軸1軸ずつチューニングを行った。つぎに、調整された推論ルールを用い、チューニングに用いた信号と異なる入力信号で各軸のファジィモデルの妥当性を検討した後、各々の調整された推論ルールを組み合わせることで2軸を同時に駆動した場合のモデリングを行った。以下にその結果を述べる。

#### 5.4.1 チューニング結果

各動作モードにおいて、2軸のうち一方を固定し他方に正弦波入力を与えた実測データによりチューニングを行った。代表例としてブームが長く、起伏角が高い場合の伸縮動作についてチューニング初期段階およびチューニング後の推論結果を図5.8(a)(b)に示す。同様にブームが短く、起伏角が低い場合の起伏動作についてチューニング初期段階およびチューニング後の推論結果を図5.9(a)(b)に示す。正弦波入力の周期は伸縮、起伏それぞれ15[s]と50[s]であり、両軸とも推論ルールの調



(a) Early stage of tuning

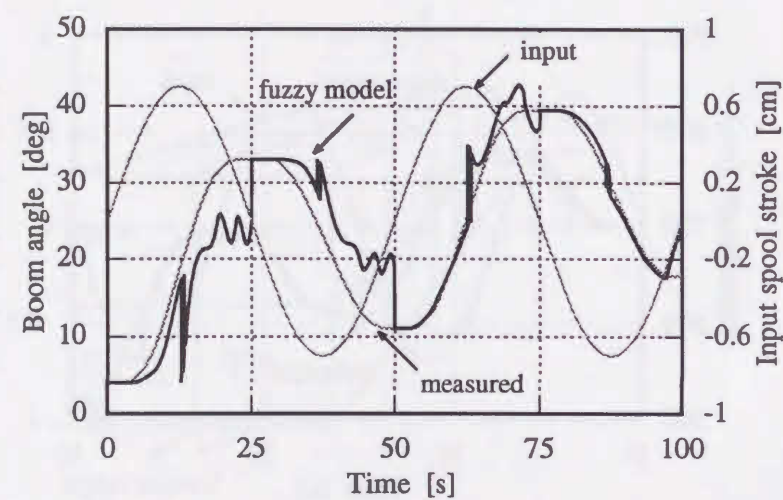


(b) After tuning

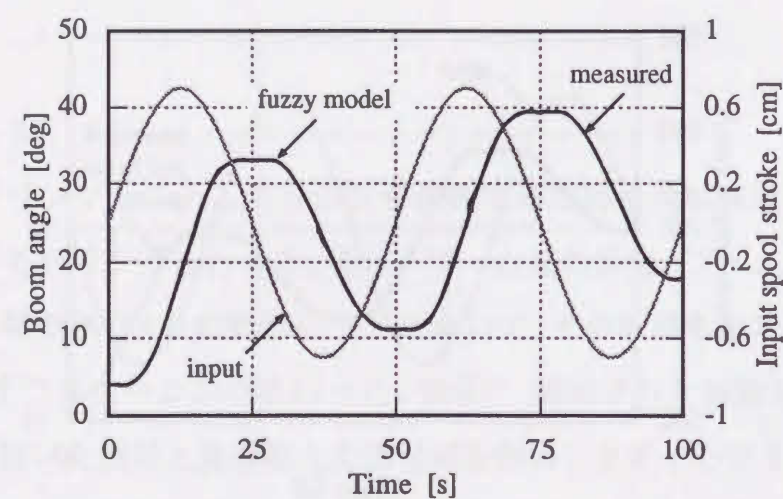
図 5.8 伸縮軸のチューニング結果



整パラメータの初期値はすべて零に設定している。チューニング初期段階では両軸ともに推定誤差が大きいものの、チューニング後においては実測値  $y^q$  と推論値  $y^{q*}$  は良く一致しており、適切なファジィモデルが構築されたことがわかる。また、チューニングの過程における各軸の二乗平均誤差を図 5.10(a)(b) に示す。伸縮軸、起伏軸ともに 50 周期ほどで推論誤差はほぼ収束している。

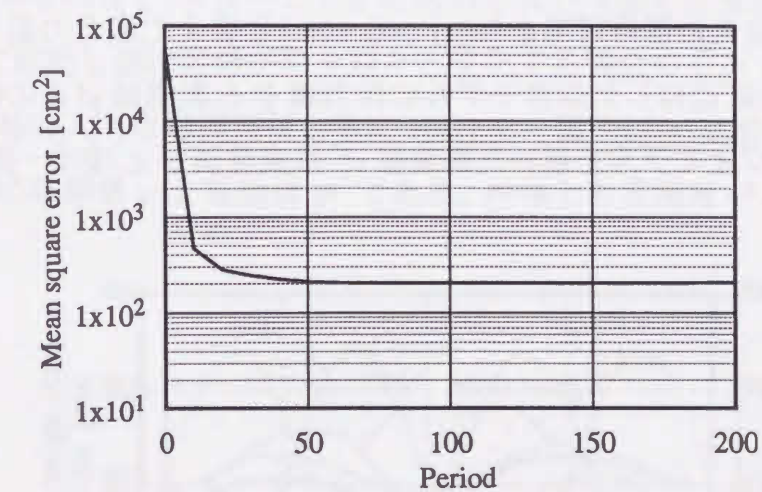


(a) Early stage of tuning

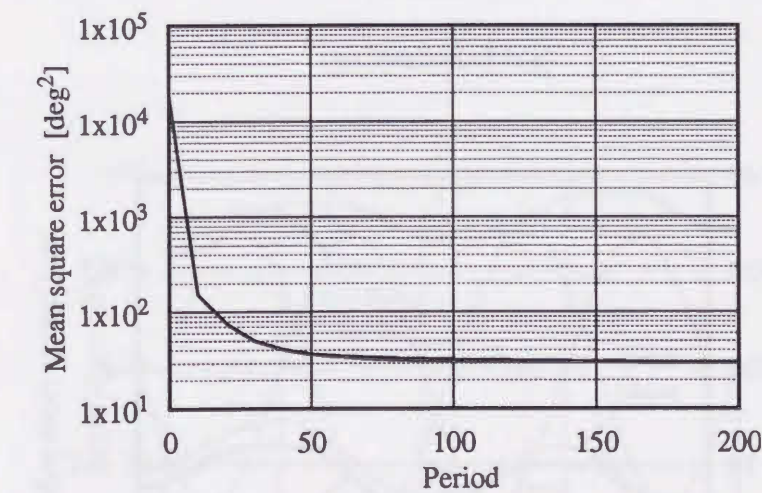


(b) After tuning

図 5.9 起伏軸のチューニング結果



(a) Telescoping



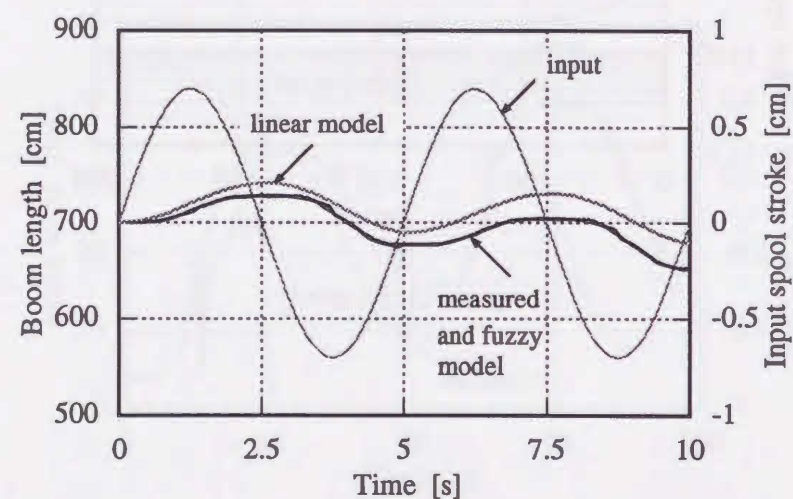
(b) Elevation

図 5.10 チューニング過程における二乗平均誤差の応答

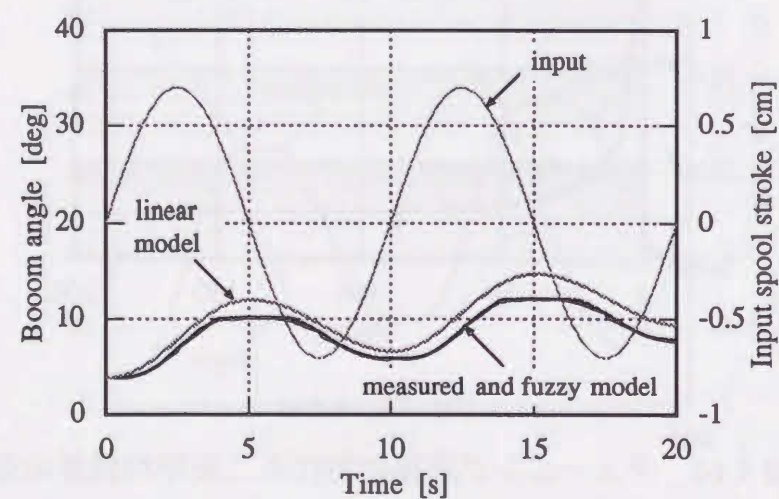


#### 5.4.2 モデリング結果

各軸とも十分チューニングを行ったファジィモデルに対し、同じ作業姿勢でチューニングに用いた信号と異なる周期の入力信号を与えた場合の推論結果を図5.11に示す。図5.11(a)は入力信号周期を15[s]から5[s]に変えた場合の伸縮動作の結果で、図5.11(b)は入力信号周期を50[s]から10[s]に変えた場合の起伏動作の結果である。両軸ともに近似した線形モデルの出力値  $\hat{y}^q$  と実測値  $y^q$  との間には誤差があるものの、ファジィモデルを用いた推論値  $y^{q*}$  は実測値  $y^q$  とほぼ一致しており、



(a) Telescoping

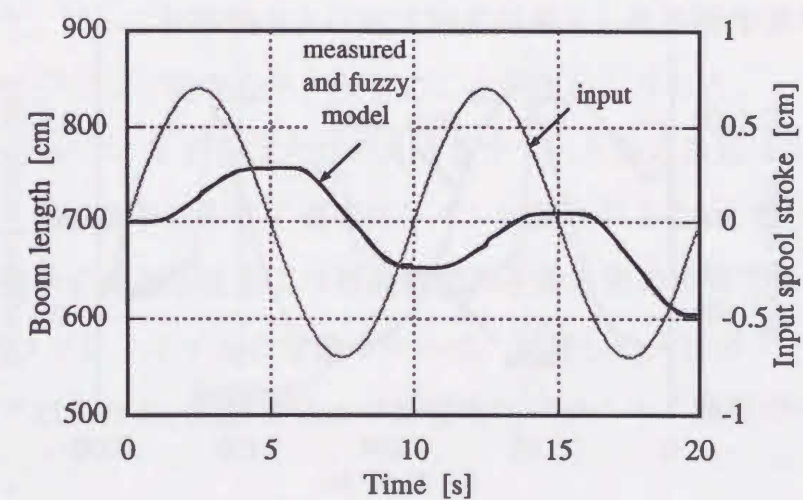


(b) Elevation

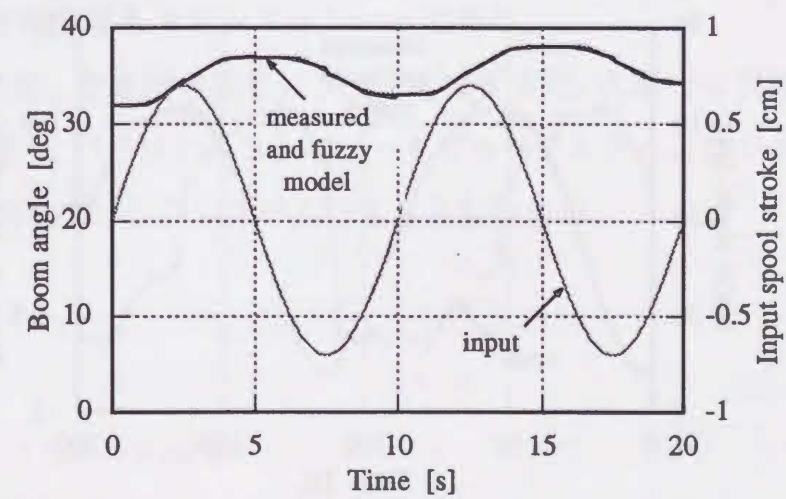
図 5.11 各軸単独駆動時のモデリング結果

入力信号周期が変化した場合においても提案したファジィモデリングの有効性が確認された。

つぎに、ブーム長の長短、起伏角の高低といった4つの動作モードにおいて伸縮軸、起伏軸いずれか一方を固定した実測データをもとに1軸ずつ学習させた推論ルールを組み合わせ、チューニングに用いた入力周期とは異なる入力信号に対する2軸同時に駆動し機械姿勢が時々刻々と変化する場合のモデリング結果を図5.12に示す。両軸の入力信号周期はともに10[s]で、図5.12(a)は伸縮動作、図5.12(b)は起伏動作の実測値  $y^q$  と推論値  $y^{q*}$  である。両軸とも実測値  $y^q$  と推論値  $y^{q*}$  はほぼ



(a) Telescoping

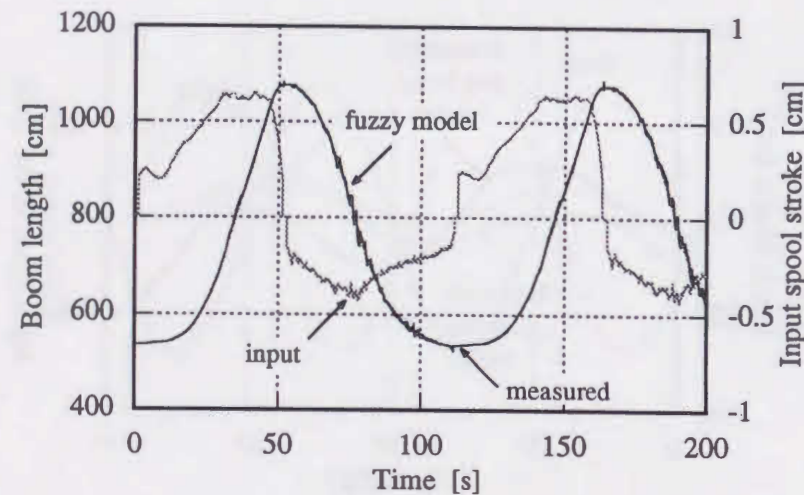


(b) Elevation

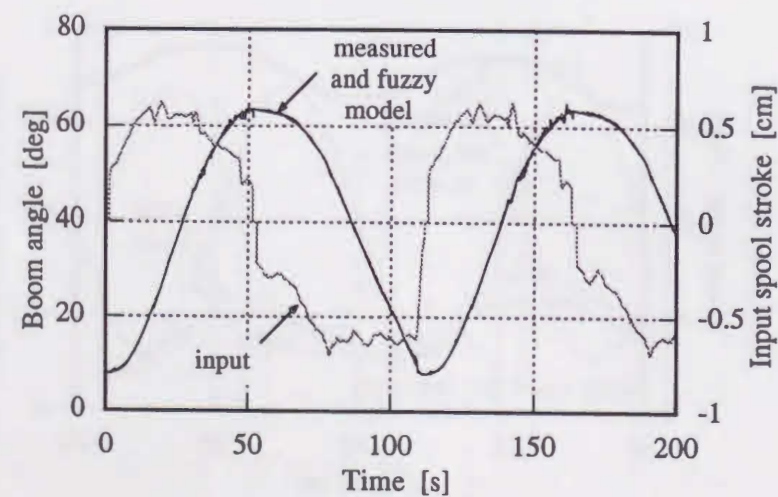
図 5.12 2 軸同時駆動時のモデリング結果



一致しており、入力信号周期の変更のみならず駆動軸間の干渉を含めモデリングできていることが確認された。さらに、作業現場での高所作業車の利用状態の一例として、ブーム伸縮軸、起伏軸を用いた作業台の垂直移動時のモデリング結果を図5.13に示す。図5.13(a)は伸縮軸、図5.13(b)は起伏軸のそれぞれ実測値 $y^q$ と推論値 $y^q^*$ である。両軸とも実測値 $y^q$ と推論結果 $y^q^*$ はほぼ一致しており、実際の利用状態での高所作業車のモデリングが可能であることが確認された。



(a) Telescoping



(b) Elevation

図 5.13 垂直移動時のモデリング結果

## 5.5 まとめ

線形モデルを利用したファジィ推論による高所作業車のモデリングについて検討した。高所作業車は強い非線形特性を有し、その複雑な構造から精密な物理モデルの作成には困難を要する。提案したファジィモデルは、特徴的な機械姿勢における近似線形モデルを用い、ファジィ推論により高所作業車の特性を模擬するものである。モデリング結果の優劣を左右する推論ルールは、入出力信号のみの実測結果に基づいて推論誤差を最小化するように自動調整され、調整後は任意の機械姿勢あるいは入力信号に対するファジィモデルが構築される。

実機を用いて、ブーム伸縮軸および起伏軸を対象とした高所作業車の単軸動作、複合軸動作のモデリング結果から、以下のことが明らかとなった。

- (1) 提案したファジィモデルは入力の大さやブーム長の長短、ブーム起伏角の高低といった機械姿勢に応じて適切にゲイン調整されるため、油圧アクチュエータや機械構造物の非線形性および駆動軸間の干渉を含め模擬できている。
- (2) 提案したファジィモデルの推論ルールは、実測した入出力データのみから自動的に調整されるため、設計者による反復的なパラメータ調整が不要であり、実用的である。
- (3) わずかな計算で出力が得られるため、大型計算機やワークステーションなどの高速演算能力を必要とせず、低速なパーソナルコンピュータや実装するコントローラの空き時間でも十分シミュレートできる。

以上より、提案した高所作業車のファジィモデルは、入出力の実測データのみからモデルを構築し、パーソナルコンピュータでもリアルタイムなシミュレータを構築できる実用的モデリングシステムであると思われる。



## 第6章

### 結 言

本研究は、建設機械のひとつである高所作業車に対し、ファジィ推論を用いた油圧サーボコントローラ、多軸の協調制御コントローラおよびモデリングについて実用性を前提として検討し、実機への適用によりその有用性を明らかにした。

まず、第3章では、非線形性の強い油圧サーボ系に自己調整ファジィコントローラ(STFC)を適用する場合の制御ルール低減化法について検討した。制御ルールの低減化法として、入力信号を予め2つの入力信号のペアに分割しそれぞれの2入力信号間で制御ルールを構成するリング方式と、入力信号をそれぞれ独立にし各信号の大きさに応じてゲインを調整するためのルールを構成するセパレート方式を入力信号すべての組み合わせを考えてルールを構成する従来のクロス方式に比較検討した。提案した各方式を高所作業車のブーム伸縮軸の油圧アクチュエータに適用し、追従特性を実測した。その結果、いずれの方式も、油圧アクチュエータの非対称性や非線形性を補償し、追従特性の著しい改善に有効であり、その中でもセパレート方式は最もルール数の低減効果が大きく、実装に要するメモリ量やサンプリング毎に出力算定に要する演算量が少なくCPUへの負担が軽減される。さらに、セパレート方式は他の方式より冗長度の低いルール構成から調整が高速に行われるとともに、汎化能力にも優れる。以上より、油圧サーボ系への実用的観点から、追従特性の改善と調整工程の簡略化に対し、セパレート方式を用いたSTFCが最も有効であると思われる。

多軸の協調化問題に着目した第4章では、高所作業車の作業台の垂直・水平移動に代表される多軸の協調化問題に対し、第3章で検討したセパレート方式のSTFCにより油圧アクチュエータの非線形性を補償し追従特性の改善を図ったうえで、各軸の動特性や各軸の目標値が異なったものどうしが互いに譲り合い調和して共通の目標を達成するため、1) 非干渉化コントローラ、2) 協調動作コントローラを導入し、協調化を行った。非干渉化コントローラは駆動軸間の相互干渉を抑制することを目的とし、協調動作コントローラは幾何学的な協調動作モデルから目標軌道から

のずれを補正するべく動作する。実機を用いて、ブーム伸縮軸と起伏軸の2軸の協調動作となる垂直移動およびブーム伸縮軸、起伏軸と旋回軸の3軸の協調動作となる水平移動を対象とした協調動作の実測結果から、従来の固定ゲインPIコントローラを用いた場合に比較して、位置誤差を3分の1から5分の1に抑えることができ、さらに移動速度を平均で1.3倍から1.4倍に高速化することができ、提案した高所作業車の多軸協調制御システムは、操作の自動化・簡略化を図りオペレータの負担を軽減する実用的で高精度なシステムであると思われる。

油圧アクチュエータにより駆動される複数の駆動軸と複雑な機械構造から構成される高所作業車は、油圧機器のや機械構造物が有する強い非線形特性に加え、機械の姿勢変化に伴って重力の影響を受けシステムのパラメータも変動する。第3章、第4章では、このようなシステムを高精度に制御する実用的な制御コントローラの検討を行った。これらのコントローラの効率よい設計には、各軸の非線形性を含み機械の姿勢により変化する動特性を持つモデルが必要である。そのため第5章では、線形モデルを利用したファジィ推論による高所作業車の実用的モデリングシステムについて検討した。提案したシステムは、特徴的な機械姿勢における近似線形モデルを用い、入出力信号のみの実測結果に基づいて推論ルールを自動調整する自己調整ファジィ推論により高所作業車の動作を模擬するものである。実機を用いて、ブーム伸縮軸および起伏軸を対象とした高所作業車の単軸動作、多軸動作の実測から、油圧アクチュエータや機械構造物の非線形性および駆動軸間の干渉を含め模擬できており、設計者による反復的なパラメータ調整が不要で、かつ大型計算機等の高速演算能力を必要とせず、わずかな計算で出力が得られるためパーソナルコンピュータや実装する組み込み型制御機器でもリアルタイムなシミュレータを構築できる実用的モデリングシステムであると思われる。

土木・建設工事の品質・精度への要求が高度化・多様化するなかで熟練工不足や技能の低下といった状況下において品質を確保し施工精度の安定化を図り、また危険作業・苦渋労働から労働者を解放して省人化・省力化、工期短縮、作業環境の改善により施工を合理化するために建設機械は欠かせない。そこで実用を前提とし、建設機械を自動化、高機能化、操作の簡略化により'人にやさしい機械'とする制



御システムおよびこれらのコントローラの効率よい設計のためのモデリング手法を提案し、その有用性を明らかにした。今後は、精度のみならず人間の感性も考慮し、人と機械の調和さらには融合したシステムを目指す所存である。

## 参考文献

### [第1章 緒言]

- 1) 「ポケット統計情報 (3 労働・賃金)」, 総務庁統計局, 1997
- 2) 「ポケット統計情報 (2 人口・世帯)」, 総務庁統計局, 1997
- 3) 「平成8年事業所・企業統計調査」, 総務庁統計局, 1997
- 4) 「平成4年就業構造基本調査の結果」, 総務庁統計局, 1992
- 5) 「平成8年における労働災害発生状況」, 中央労働災害防止協会, 1996
- 6) 河野俊助編: 「新油圧技術読本」, 日刊工業新聞社, 1989
- 7) 金子敏夫著: 「油圧機器と応用回路」, 日刊工業新聞社, 1991
- 8) 辻著: 「例解演習油圧工学」, 日刊工業新聞社, 1988
- 9) 中野, 今野: 「電動機と油圧モータの特性対比に関する調査」, 油圧と空気圧, Vol.28, No.4, pp100-106, 1997
- 10) (社)日本油空圧工業会編集委員会編: 「実用油圧ポケットブック」, (社)日本油空圧工業会, 1982
- 11) 建設機械研究会編: 「建設機械ハンドブック」, 鹿島出版会, 1992
- 12) L. A. Zadeh: 「Fuzzy Sets」, *Information and Control*, Vol.8, pp.338-353, 1965
- 13) L. A. Zadeh: 「Fuzzy Algorithms」, *Information and Control*, Vol.12, pp.94-102, 1968



- 14) L. A. Zadeh : 「A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges」, *Journal of Cybernetics*, Vol.2, pp.4-34, 1972
- 15) L. A. Zadeh : 「Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes」, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol.SMC-3, No.1, pp.28-44, 1973
- 16) L. A. Zadeh : 「The Concept of a Linguistics Variable and its Application to Approximate Reasoning Part 1」, *Information Sciences*, Vol.8, pp.199-249, 1975
- 17) L. A. Zadeh : 「The Concept of a Linguistics Variable and its Application to Approximate Reasoning Part 2」, *Information Sciences*, Vol.8, pp.301-357, 1975
- 18) L. A. Zadeh : 「The Concept of a Linguistics Variable and its Application to Approximate Reasoning Part 3」, *Information Sciences*, Vol.9, pp.43-80, 1976
- 19) 菅野 : 「あいまい集合と理論の制御への応用」, 計測と制御, Vol.18, No.2, pp.150-160, 1979
- 20) 塚本 : 「あいまい推論」, 計測と制御, Vol.21, No.7, pp.139-145, 1983
- 21) 菅野, 高木 : 「あいまい制御」, 計測と制御, Vol.22, No.1, pp.84-86, 1983
- 22) M. Sugeno : 「An Introductory Survey of Fuzzy Control」, *Information Sciences*, Vol.36, pp.59-83, 1985
- 23) 宮本 : 「Fuzzy 制御とその応用」, 計測と制御, Vol.25, No.5, pp.54-61, 1986
- 24) 寺野, 浅井, 菅野共編 : 「ファジィシステム入門」, オーム社, 1987
- 25) 寺野著 : 「実用ファジィ制御技術」, 電子情報通信学会, 1991
- 26) 特集 : 「ファジィロボット」, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, 1988

- 27) 特集 : 「ニューロおよびファジィのロボットへの応用」, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.2, 1991
- 28) 薮田, 青島 : 「ファジィ技術のロボットへの応用」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.1, 1993
- 29) 特集 : 「ファジィシステムの新しい応用」, 電気学会論文誌 C, Vol.113-C, No.7, 1993
- 30) 解説 : 「ファジィ制御を考える」, 電気学会論文誌 D, Vol.113-D, No.1, 1993
- 31) 特集 : 「ファジィ制御の最近の展開」, システム／制御／情報, Vol.38, No.11, pp.585-624, 1994
- 32) J. Fukumi, T. Kamano, T. Suzuki and Y. Kataoka : 「Positioning System with Progressive Wave-Type Ultrasonic Motor under Self-Tuning Fuzzy Control」, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.7, No.1, pp.63-68, 1995
- 33) 山崎, 菅野 : 「自動学習ファジィコントローラ」, 計測自動制御学会論文誌, Vol.20, No.8, pp.720-726, 1984
- 34) 前田, 村上 : 「自動調整ファジィコントローラ」, 計測自動制御学会論文誌, Vol.24, No.2, pp.191-197, 1988
- 35) 野村, 林, 若見 : 「デルタルールによるファジィ推論の自動チューニング法と障害物回避への応用」, 第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.177-182, 1989
- 36) 林, 野村, 若見 : 「ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得」, 日本ファジィ学会論文誌, Vol.2, No.4, pp.585-597, 1990
- 37) 田中, 佐野, 竹間 : 「周波数特性に着目したファジィ制御器の構成と $\delta$ ルールによる自己調整」, 計測自動制御学会論文誌, Vol.29, No.7, pp.826-832, 1993



- 38) 堀川：「ニューラルネットワークによる学習型ファジィ制御器」，計測自動御学会論文誌，Vol.27，No.2，pp.208-215，1991
- 39) 山岡，向殿：「ニューラルネットワークを用いたファジィ推論ルールの学習法」，第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.489-492，1991
- 40) H. Nomura, I. Hayashi and N. Wakami：「A Self-tuning Method of Fuzzy Control by Descent Method」，*Proceedings of IFSA'91*，pp.155-158，1991
- 41) H. Ichihashi：「Iterative Fuzzy Modeling and Hierarchical Network」，*Proceedings of IFSA'91*，pp.49-52，1991
- 42) 市橋：「ニューロ的手法によるファジィルールの調整」，日本ファジィ学会論文誌，Vol.5，No.2，pp.191-203，1993
- 43) 湯，渡辺，中村，古賀：「ファジィ・ガウス・ニューラルネットワーク制御器とその移動ロボットへの応用」，日本機械学会論文集C，Vol.59，No.564，pp.2290-2976，1993
- 44) 古橋：「ニューラルネットワークによるファジィルールの表現」，日本ファジィ学会論文誌，Vol.5，No.2，pp.204-217，1993
- 45) 馬野，福中，鳩野，田村：「忘却の概念を用いたファジィ・ニューラルネットワークによるファジィルールの抽出」，計測自動御学会論文誌，Vol.32，No.3，pp.409-416，1996
- 46) C. Karr, L. Freeman and D. Meredith：「Improved Fuzzy Process Control of Spacecraft Autonomous Rendezvous Using a Genetic Algorithms」，*SPIE Conf. on Intelligent Control and Adaptive Systems*，pp.274-283，1989
- 47) C. Karr：「Applying Genetics to Fuzzy Logic」，*AI Expert*，Vol.6，No.2，pp.26-33，1991

- 48) C. Karr：「Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm」，*Int'l Conf. of Genetic Algorithm (ICGA '91)*，pp.450-457，1991
- 49) C. Karr and E. Gentry：「A Genetics-based Adaptive pH Fuzzy Logic Controller」，*Int'l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf. (IFSICC '92)*，pp.255-264，1992
- 50) C. Karr, S. Sharma, W. Hatcher and T. Harper：「Control of an Exothermic Chemical Reaction Using Fuzzy Logic and Genetic Algorithms」，*Int'l Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf. (IFSICC '92)*，pp.246-254，1992
- 51) 西山，高木，R.R.Yager，中西：「遺伝的アルゴリズムを用いたファジィ推論ルールの自動生成」，第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，UA3-2，pp.237-240，1992
- 52) 高濱，宮本，小倉，中村：「遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御規則の学習」，第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，UA3-2，pp.241-244，1992
- 53) 山田：「GAを用いたファジィ適応制御」，電気学会論文誌D，Vol.114-D，No.10，pp.943-946，1994
- 54) A. Homaifar, E. McCormick：「Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms」，*IEEE Trans. on Fuzzy Systems*，Vol.3，No.2，pp.129-139，1995
- 55) 増田，伊藤，佐藤：「遺伝子長可変型 GA によるファジィ推論ルールの獲得手法」，電気学会論文誌C，Vol.115-C，No.11，pp.1265-1272，1995
- 56) 野村，林，若見：「最急降下法によるファジィ推論の自動チューニングと障害物回避への応用」，第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，SB2-1，pp.423-426，1990



- 57) 渡辺, 市橋:「フィードバック誤差学習によるロボットマニピュレータのファジィ制御」, システム制御情報学会論文誌, Vol.3, No.7, pp.208-215, 1991
- 58) 水本:「分かりやすいファジィ理論Ⅲ」, コンピューtrol, 28, pp.32-45, 1989
- 59) 水本:「ファジィ制御向きのファジィ推論法」, 計測と制御, Vol.28, No.11, pp.499-504, 1989
- 60) 日本溶接協会:「炭酸ガス半自動アーク溶接」, 産報出版, 1986
- 61) 電気学会編:「電気工学ハンドブック」, 電気学会, 1988
- 62) M. Aicardi, G. Cannata, and G. Casalino:「Hybrid Learning Control Techniques for the Manipulation of Rigid Objects」, in *Proc. of the 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.672-677, 1993
- 63) M. W. Walker, D. Kim, and J. Dionise:「Adaptive Coordinated Motion Controller of Two Manipulator Arms」, in *Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1084-1090, 1989
- 64) Y. R. Hu, and A. A. Goldenberg:「An Adaptive Approach to Motion and Force Control of Multiple Coordinated Robot Arms」, in *Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1091-1096, 1989
- 65) 浪花, 有本:「複数マニピュレータの協調制御に対する学習制御と Model-Based 適応制御」, 計測制御学会論文集, Vol.32, No.5, pp.706-713, 1996
- 66) 杉江, 澁川:「複数アクチュエータによる  $H^\infty$  協調制御—設計法と実験検証—」, 計測制御学会論文集, Vol.32, No.4, pp.495-501, 1996
- 67) 特集:「油空圧技術者が望むシミュレーションツールと各種ソフトウェアの紹介」, 油圧と空気圧, Vol.27, No.4, 1996

- 68) 特集:「油空圧システムの動特性シミュレーション技法」, 油空圧技術, Vol.32, No.7, No.8, 1993

## [第2章 高所作業車]

- 69) (株) タダノ:「商品知識ガイドブック (高所作業車, カーゴクレーン, ラフター・トラッククレーン&オールテレーンクレーン)」, 1993, 1995, 1994
- 70) (株) タダノ:「Super Deck AC-125S」, カタログ, 資料番号 AC-125S-1-0-94-4-253-10-81-819-A, 1994
- 71) (株) タダノ:「Super Deck AC-125S」, 取扱説明書, 資料番号 AC-125S-1/O1-1J, 1994

## [第3章 ファジィ制御を用いた単軸位置制御システム]

- 72) 山橋, 高橋, 池尾:「適応制御理論の電気油圧サーボシステムへの応用」, 油圧と空気圧, Vol.21, No.7, pp.688-695, 1990
- 73) 山橋, 高橋, 池尾:「一般化最小分散適応制御理論の電気油圧サーボシステムへの応用」, 油圧と空気圧, Vol.22, No.3, pp.341-347, 1991
- 74) 真田, 北川:「慣性負荷を有する電気油圧サーボ機構の連続時間領域における適応制御手法の研究」, 機械学会論文集 C, Vol.57, No.535, pp.840-847, 1991
- 75) 阿部, 小波:「電気油圧サーボシステムの動特性改善」, 油圧と空気圧, Vol.24, No.1, pp.130-137, 1993
- 76) 中尾, 蒲田:「電気油圧サーボシステムの適応フィードフォワード制御」, 機械学会論文集 C, Vol.60, No.569, pp.190-197, 1994



- 77) 岩井, 筒井, 甲斐:「並列フィードフォワード補償を併用した単純適応制御系とその寄生要素に関するロバスト性」, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.9, pp.996-1001, 1991
- 78) Z. Iwai, I. Mizumoto and M. Deng:「A Parallel Feedforward Compensator Virtually Realizing Almost Strictly Positive Real Plant」, in *Proc. of the 33rd IEEE Conf. on Decision and Control*, pp.2827, 1994
- 79) 岩井, 江頭, 日野, 高橋:「単純適応制御 SAC 手法の油圧サーボシステムの位置制御への応用」, 機械学会論文集 C, Vol.61, No.590, pp.187-191, 1995
- 80) 島田:「外乱トルク・速度推定オブザーバを用いた低剛性マニピュレータ制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7, pp.983-989, 1992
- 81) 小菅, 伊藤, 福田, 坂本, 野間, 米澤:「外乱推定オブザーバを用いた油圧駆動式マニピュレータの制御」, 日本機械学会論文集 C, Vol.59, No.563, pp.2152-2156, 1993
- 82) 横田, 森本, 虎谷:「配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度ロバスト制御, 第1報」, 油圧と空気圧, Vol.25, No.1, pp.113-117, 1994
- 83) 横田, 三橋, 虎谷, 山本:「配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度ロバスト制御, 第2報」, 油圧と空気圧, Vol.25, No.6, pp.94-100, 1994
- 84) 横田, 三橋, 虎谷:「外乱オブザーバを用いた二軸アームの高精度軌跡制御」, 油圧と空気圧, Vol.25, No.6, pp.746-752, 1994
- 85) 山本, 横田:「油圧マニピュレータの高精度位置決め制御」, 日本機械学会論文集 C, Vol.61, No.585, pp.1981-1986, 1995
- 86) 西田, 西村, 本家, 中上:「柔軟関節を持つマニピュレータのロバスト制御, オブザーバと2自由度コントローラの適用」, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, pp.466-473, 1994

- 87) 山本, 横田, 三橋:「配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度ロバスト制御, 第3報」, 油圧と空気圧, Vol.26, No.7, pp.896-902, 1995
- 88) 真田, 北川:「管路動特性を考慮した閉ループ圧力制御系のロバスト制御」, 日本機械学会論文集 C, Vol.61, No.589, pp.3559-3566, 1995
- 89) 山本, 横田, 田村:「 $H^\infty$ 制御理論による6軸電気油圧マニピュレータのロバスト制御」, 油圧と空気圧, Vol.28, No.1, pp.99-107, 1997
- 90) 塚越, 真田, 北川:「3層ニューラルネットワークによるサーボモータの回転数定常特性の線形化」, 平成5年秋季油空圧講演会論文集, pp.133-136, 1993
- 91) K. Sanada, A. Kitagawa and W. Pingdong:「An Application of a Neural Network to Adaptive Control of a Servo System」, *Proc. 2nd JHPS Int. Symp. on Fluid Power* (ed.), T. Maeda, pp.303-308, E&FN SPON, 1993
- 92) 真田, 北川:「線形二層ニューラルネットワークによるサーボ機構の適応制御」, 日本機械学会論文集 C, Vol.60, No.570, pp.569-576, 1994
- 93) 真田:「ニューラルネットワークの基礎と油空圧システムへの応用」, 日本油空圧学会常設教育講座資料, pp.31-47, 1994
- 94) 平工, 武藤, 山田:「電気・油圧サーボシステムのファジィ制御」, 日本機械学会論文集 C, Vol.58, No.555, pp.3285-3290, 1992
- 95) Q. Wang, A. Luo, Y. Lu, Edited by T. Maeda:「Intelligent control for electro propotional cylinder」, *Fluid Power*, pp.309-313, 1993
- 96) 武藤, 干, 武田, 山田:「電気油圧サーボ系の自己調整ファジィ制御」, 油圧と空気圧, Vol.27, No.4, pp.550-557, 1996
- 97) 柳下, 伊藤, 菅野:「ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用」, システムと制御, Vol.28, No.10, pp.597-604, 1984



- 98) 桜井, 小林, 加藤, 荒井, 前川:「糖分抽出塔へのファジィ制御の適用」,  
計装, Vol.30, No.10, pp.38-40, 1987
- 99) 村瀬, 白井, 伊藤:「下水ポンプ所へのファジィ制御適用」, 第6回ファジィ  
システムシンポジウム講演論文集, pp.219-222, 1990
- 100) 塩野, 白井, 入山, 鈴木, 中:「下水汚濁溶融炉のファジィ制御」, 第8回  
ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.85-88, 1992
- 101) 伊藤:「プロセス制御分野におけるファジィ制御の意義と役割」, 日本ファ  
ジィ学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.19-34, 1996
- 102) 谷, 歌代, 馬野, 田中:「ファジィ推論により目標値を設定するファジィ補  
正型PID制御とそのプラント過渡状態制御への適用」, 計測自動制御学会論  
文集, Vol.33, No.10, pp.1002-1009, 1997
- 103) 日本油空圧学会編:「油空圧便覧」, オーム社, 1989
- 104) 笹尾, 横田, 一柳:「油圧ショベルの軌跡制御に関する研究」, 9th  
Symposium on Fluid Control, pp.13-18, 1994
- 105) 横田, 笹尾, 一柳:「油圧ショベルのブーム, アーム系の高精度軌跡制御」,  
日本機械学会論文集C, Vol.62, No.593, pp.161-167, 1996
- 106) 寺野, 増井, 長屋:「ブルドーザのファジィ制御Ⅰ」, 第6回ファジィシステ  
ムシンポジウム講演論文集, pp.201-204, 1990
- 107) 寺野, 増井, 長屋:「ブルドーザのファジィ制御Ⅱ」, 第7回ファジィシステ  
ムシンポジウム講演論文集, pp.283-286, 1991
- 108) 宮嶋, 佐藤, 水谷:「建設機械へのファジィ制御の適用」, 第7回ファジィシ  
ステムシンポジウム講演論文集, pp.255-258, 1991

- 109) 戸田, 林, 栗田, 遠藤:「ファジィ制御によるフォークリフトの荷役制御」,  
第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.41-44, 1993
- 110) 伊藤, 右田, 入江, 伊藤:「クレーン自動運転へのファジィ制御の適用」,  
日本ファジィ学会誌, Vol.6, No.2, pp.402-408, 1994
- 111) 知久, 山田, 藤川:「旋回クレーン振れ止め制御へのファジィ制御方式の導  
入」, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.749-752, 1994
- 112) 鮫島, 藤井:「ファジィ理論による油圧ショベル向け自動掘削制御装置の開  
発」, 機械学会ロボメカ講演会論文集, Vol.A, pp.509-512, 1995
- 113) 谷住, 芳村, 日野, 坂井:「トラッククレーンの動特性のモデル化と制御に  
関する研究(油圧系を考慮した旋回運動の速度制御)」, 日本機械学会論文集  
C, Vol.61, No.582, pp.540-548, 1995
- 114) E. H. Mamdani:「Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple  
Dynamic Plant」, *Proc. of IEEE*, 121-12, pp.1585-1588, 1974
- 115) E. H. Mamdani:「Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller」,  
*Int.J.Man-Machine Studies*, 8-6, pp.669-679, 1976
- 116) 日本ファジィ学会編集委員会(編):特集「ファジィ応用製品・技術」, 日  
本ファジィ学会誌, Vol.3, No.2, pp.154-211, 1991
- 118) 市橋, 田中:「PIDとファジィのハイブリッド型コントローラ」, 第4回ファ  
ジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.97-102, 1988
- 119) 市橋, 渡辺:「簡略化ファジィ推論を用いたファジィモデルによる学習型制  
御」, 日本ファジィ学会誌, Vol.2, No.3, pp.429-437, 1989
- 120) 水本:「ファジィ制御に対する改善法(5)ー強調型および抑制型のファジィ  
制御規則を使用した場合」, 第7回ファジィシステムシンポジウム講演論  
文集, pp.269-273, 1991



- 121) 水本：「ファジィ制御に対する改善法(6)ーファジィシングルトン型推論法による場合」, 第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.26-88, 1992
- 122) 水本：「ファジィ制御に対する改善法(7)ーファジィシングルトン型推論法と代数積加算重心法との等価性」, 第9回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.313-316, 1993
- 123) 水本：「ファジィ制御に対する改善法(3)」, 第5回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.499-504, 1989
- 124) C. Psaltis, et al : 「A Multilayered Neural Network Controller」, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.8, No.2, pp.17-21, 1988
- 125) 北村：「ニューラルネットワーク応用の現状と展望ー計測制御の立場から」, システム／制御／情報, Vol.35, No.1, pp.2-10, 1991
- 126) M. Jordan : 「Supervised Learning and Systems with Excess Degree of Freedom」, *COINS Technical Report*, Vol.88, No.27, pp.1-41, 1988
- 127) M. Kawato, et al : 「A Hierarchical Neural-network Model for Control and Learning of Voluntary Movement」, *Biol. Cybern.*, Vol.57, pp.169-185, 1987
- 128) 林, 馬野：「ファジィ・ニューラルネットワークの現状と展望」, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.2, pp.178-190, 1993

#### [第4章 ファジィ制御を用いた多軸協調制御システム]

- 129) 南：「アーク溶接ロボット」, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.6-9, 1995

- 130) 笠上, 石松, 藤田：「協調動作を行うティーチング・プレイバックロボットの制御方式」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.1, pp.165-170, 1993
- 131) 杉本, 今西, 山村, 絹川, 木邑：「クレーンの水平引き込みシミュレーション」, 建設の機械化, Vol.87, No.1, pp.38, 1987
- 132) 頭井, 今西, 山村, 絹川, 木邑：「クレーンの水平引き込みシミュレーション」, 神戸製鋼技報, Vol.37, No.4, pp.45-48, 1987
- 133) 成沢, 佐藤, 伊達, 竹田：「多関節アーム作業機の軌跡制御システム」, 油圧と空気圧, Vol.23, No.5, pp.14-15, 1992
- 134) 油田：「複数の自立移動ロボットの協調行動」, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.433-438, 1992
- 135) S. Arimoto, F. Miyazaki and S. Kawamura : 「Cooperative Motion Control of Multiple Robot Arms or Fingers」, *Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1407-1412, 1987
- 136) Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa : 「Mechanics of Coordinative Manipulation by Multiple Robotic Mechanisms」, *Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.991-998, 1987
- 137) 杉江, 隈下, 小野：「複数のマニピュレータによる物体の協調的操り」, システム制御情報学会論文誌, pp.144-151, 1987
- 138) P. Hsu, Z. Li and S. Sastry : 「On Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot Hand」, *Proc. of the 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.384-389, 1988
- 139) 吉川, 鄭：「拘束運動下にある対象物の複数台ロボットによる協調ハイブリッド制御」, システム制御情報学会論文誌, Vol.3, No.10, pp.326-334, 1990



- 140) 小菅：「複数のマニピュレータによる協調制御」，日本ロボット学会誌，Vol.10, No.4, pp.439-443, 1992
- 141) 依田，江上：「最適同期化経路制御系とその応用」，第29回自動制御連合講演会前刷り，2022, 1996
- 142) 伊藤，土谷：「面積評価項を含む予見制御系の経路制御への応用」，計測自動制御学会論文集，Vol.25, No.7, pp.771, 1989

# [第5章 ファジィモデリング]

- 143) 坂和，中住：「油圧シリンダを用いた旋回式クレーンのモデリングと制御」，計測自動制御学会論文集，Vol.21, No.3, pp.298, 1985
- 144) 今西：「リンク構造のシミュレーションに関する研究」，機械学会論文集 C Vol.53, No.492, pp.1711, 1987
- 145) 山本，河田：「油圧シミュレーション解析」，(株)タダノ Engineering Review, No.7, pp.12-16, 1990
- 146) 山崎，長尾，池上，山本：「油圧回路のシミュレーション，第1報」，(株)タダノ Engineering Review, No.8, pp.19-22, 1990
- 147) 山崎，長尾，池上，山本：「油圧回路のシミュレーション，第2報」，(株)タダノ Engineering Review, No.11, pp.15-18, 1991
- 148) S. Iida, et al：「Dynamic Simulation and Analysis System for Electro-Hydraulic Circuit」，SAE Technical Paper 921688, 1992
- 149) 山崎，長尾，池上，山本：「油圧回路のシミュレーション，第3報」，(株)タダノ Engineering Review, No.13, pp.25-30, 1992
- 150) 山崎，長尾，池上，山本：「油圧回路のシミュレーション，第4報」，(株)タダノ Engineering Review, No.16, pp.30-37, 1993

- 151) 谷住，芳村，日野，坂井：「トラッククレーンの動特性のモデル化と制御に関する研究（油圧系を考慮した旋回運動の動特性のモデル化）」，日本機械学会論文集 C, Vol.60, No.572, pp.1262-1269, 1994
- 152) 谷住，芳村，日野，坂井：「トラッククレーンの動特性のモデル化と制御に関する研究（油圧系を考慮した起伏運動の動特性のモデル化）」，日本機械学会論文集 C, Vol.60, No.572, pp.1270-1277, 1994
- 153) 田中一男：「アドバンスドファジィ制御」，共立出版社，1994
- 154) 堀川，古橋，内川：「ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法」，日本ファジィ学会論文誌，Vol.4, No.5, pp.906～928, 1992
- 155) 荒木，野村，林，若見：「ルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案」，日本ファジィ学会論文誌，Vol.4, No.4, pp.722～732, 1992
- 156) 岩崎，森田，丸山：「ファジィ推論による制御対象の同定とオートチューニングへの応用」，日本機械学会論文集 C, Vol.58, No.554, pp.2997-3002, 1992
- 157) 福田，石上，新井，柴田：「遺伝的アルゴリズムとデルタルールによるファジィモデルの自動生成」，電気学会論文誌，Vol.113-C, No.7, pp.495～501, 1993
- 158) 鎌野，福見，鈴木，原田，片岡：「自己調整ファジィコントローラを用いた高速二軸位置同期システム」，日本ファジィ学会論文誌，Vol.8, No.1, pp.47～56, 1996
- 159) 野口，谷住，鎌野，鈴木，安野：「電気油圧サーボ系における自己調整ファジィコントローラのルール数低減化法」，油圧と空気圧，Vol.28, No.7, pp.785-791, 1997



- 160) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ制御による高所作業車の高精度複合動作」, 電気学会論文誌 C, Vol.117-C, No.11, pp1573-1579, 1997
- 161) J.M.Nightingale:「油圧技術者のためのサーボ理論」, コロナ社, 1960

## 本論文に関する著者の発表論文

### 1. 主論文

- (1) 野口, 谷住, 鎌野, 鈴木, 安野:「電気油圧サーボ系における自己調整ファジィコントローラのルール数低減化法」, 油圧と空気圧, Vol.28, No.7, pp785-791, 1997 年, 11 月
- (2) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ制御による高所作業車の高精度複合動作」, 電気学会論文誌 C, Vol.117-C, No.11, pp1573-1579, 1997 年, 11 月
- (3) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「高所作業車の実用的ファジィモデリング」, システム制御情報学会論文誌 (投稿中)

### 2. 副論文

- (1) S.Noguchi, K.Kagamihara, S.Isono, T.Kamano, T.Suzuki, T.Yasuno:「High Performance Control of Construction Machine using Self-Tuning Fuzzy Technique」, Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, A Pacific Rim Conference, pp379-382, Boston, U.S.A., 1996, 7
- (2) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「自己調整ファジィコントローラを用いた高所作業車の高精度複合動作」, 日本機械学会第6回インテリジェントシンポジウム 225, 1996 年 10 月
- (3) 福見, 鎌野, 鈴木, 安野, 野口:「ファジィコントローラを用いた二自由度位置制御システム」, ファジィ学会第13回ファジィシンポジウム WEA3-3, 1997 年 6 月



- (4) 福見, 鈴木, 鎌野, 野口:「ファジィコントローラを用いた油圧システムの位置決め制御」, 阿南工業高等専門学校研究紀要第34号, (1998年3月掲載予定)

### 3. 講演会予稿集掲載論文

- (1) 飯田, 鎌野, 鈴木, 安野, 多田, 鏡原, 野口:「適応制御を用いたクレーンの吊り荷水平移動システムの応答特」, 計測自動制御学会学術講演会211M-1, 1994年7月
- (2) 野口, 鏡原, 多田, 鎌野, 鈴木, 安野, 福見:「デッキ型高所作業車のファジィモデリング」, 電気関係学会四国支部連合大会7-5, 1994年10月
- (3) 安野, 鎌野, 鈴木, 魚谷, 多田, 鏡原, 野口:「オートチューニングコントローラを用いた油圧サーボシステムの応答特性」, システム制御情報研究発表講演会1019, 1995年5月
- (4) 野口, 鏡原, 多田, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ推論を用いた油圧アクチュエータのモデリング」, 電気学会産業応用部門全国大会233, 1995年8月
- (5) 野口, 鏡原, 多田, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ推論を用いた油圧アクチュエータのモデリング」, 電気関係学会四国支部連合大会7-3, 1995年11月
- (6) 野口, 鏡原, 磯野, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ制御による高所作業車の垂直移動特性」, 電気学会全国大会675, 1996年3月
- (7) 野口, 鏡原, 草薙, 鎌野, 鈴木, 安野:「油圧サーボシステムへのファジィ制御の適用」, システム制御情報研究発表講演会3031, 1996年5月
- (8) 野口, 鏡原, 磯野, 鎌野, 鈴木, 安野:「自己調整ファジィ制御による高所作業車の位置制御」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会21タ54, 1996年6月
- (9) 野口, 鏡原, 草薙, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ制御による高所作業車の3軸協調制御」, 計測自動制御学会学術講演会105D-1, 1996年7月
- (10) 野口, 鏡原, 草薙, 鎌野, 鈴木, 安野:「自己調整ファジィ制御による高所作業車の高精度化」, 第1回知能メカトロワークショップ95, 1996年7月
- (11) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「ファジィ協調制御による高所作業車の複合操作」, 電気関係学会関西支部連合大会G3-46, 1996年11月
- (12) 柏木, 鎌野, 鈴木, 安野, 野口, 原田:「油圧高所作業車のブーム起伏軸のファジィモデリング」, 電気関係学会関西支部連合大会G3-24, 1996年11月
- (13) 野口, 鏡原, 草薙, 鎌野, 鈴木, 安野:「ルール数を低減したファジィ制御による油圧アクチュエータの位置制御」, 電気学会全国大会678, 1997年3月
- (14) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「自己調整ファジィコントローラを用いた油圧サーボシステムの応答特性」, システム制御情報研究発表講演会6115, 1997年5月
- (15) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野:「油圧アクチュエータの高精度位置サーボシステム」, 計測自動制御学会学術講演会108D-1, 1997年7月
- (16) 野口, 鏡原, 鎌野, 鈴木, 安野, 柏木:「ファジィ推論による高所作業車のモデリング」, 電気関係学会四国支部連合大会, 1997年10月



## 謝辞

本研究において徳島大学大学院工学研究科博士後期課程入学以前より徳島大学工学部鈴木茂行教授、鎌野琢也助教授には懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜り、安野卓助手には学会への参加において様々なご便宜を取り計らっていただきましたことをあつく御礼申し上げるとともに心から感謝の意を表します。

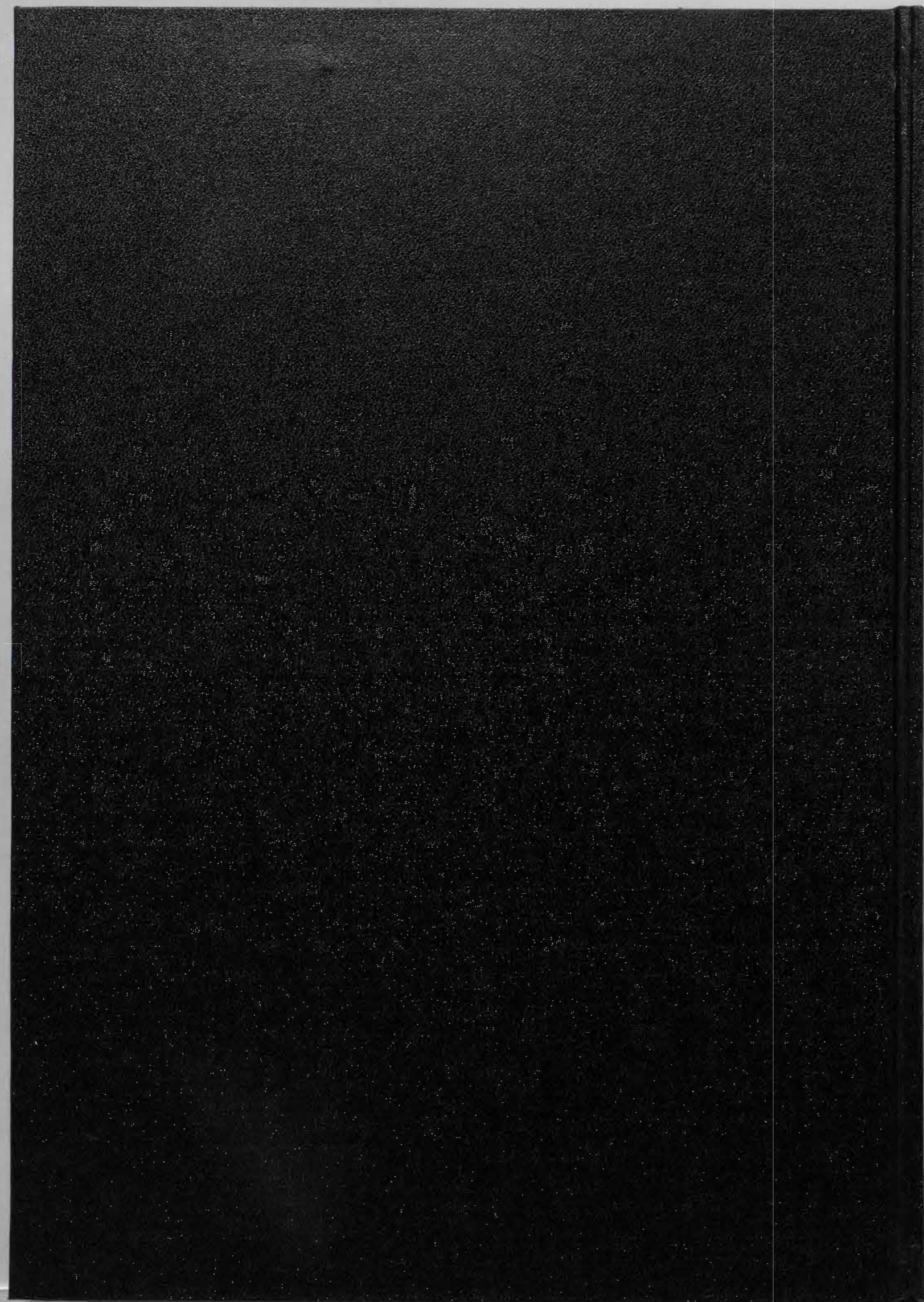
また、本論文をまとめるにあたり、本論文の詳細なご校閲および適切なご指摘、ご助言を賜りました徳島大学工学部鈴木茂行教授、木内陽介教授、大西徳生教授の諸先生方に心から感謝申し上げます。

そして、徳島大学大学院工学研究科博士後期課程において3年におよぶ国内留学の機会を与えて下さり、深いご理解とあたたかいご支援を賜りました株式会社タダノの稲井武常務取締役、中西正晴技術研究所長にあつく御礼申し上げます、また、業務を離れて国内留学中には、株式会社タダノの多田正光設計第1部グループマネージャ、石田定文企画課長、溝淵彰メカトロ開発室長には種々ご配慮賜り、まことにありがとうございました。さらに、滞りなく本研究を遂行するために各方面よりご援助頂いた株式会社タダノ技術研究所の鏡原和明チームリーダー、山本耕治担当課長、谷住和也担当係長からなるサポートチームの各位様を始め、メカトロ開発室の皆様へ深く感謝致します。なお、実験に際しましては株式会社タダノの宮家英雄部長、山下倭司グループマネージャのご厚意により、過密業務の中でスケジュールを調整いただき、また、実験装置の準備にご協力いただきました岡繁信係長、大浜毅チームリーダーをはじめ試験研究部の方々に心より御礼申し上げます。

平成7年の春より、霊峰剣山を背に紀伊水道にそそぐ四国三郎吉野川より豊かな自然に育まれた阿波の地において、国内のみならず世界から志をひとつにして集まった研究室の同門生と切磋琢磨でき、また、学会活動を通して多くの方々との交流が持てたことは私にとって大きな財産となることと思います。

最後に若輩者の私に力をお貸し下さった皆様に深く感謝の意を表して謝辞に代えさせていただきます。







論文審査の結果の要旨

報告番号	甲 工	氏 名	野 口 真 児
	乙 工 第 1 1 9 号 工 修		
審査委員	主 査	鈴木 茂 行	
	副 査	大 西 徳 生	
	副 査	木 内 陽 介	
学位論文題目			
ファジィ推論を用いた高所作業車のモデリングと制御に関する研究			
審査結果の要旨			
<p>今日、建設業では、生産性を向上させ施工の合理化を図ることが課題である。その解決策としては工事の機械化が重要である。一般に建設機械には油圧アクチュエータが用いられているが、その特性は制御弁の不感帯や片ロッドシリンダの非対称性、またバックラッシュや摩擦などの強い非線形性を有している。</p> <p>本論文では、この油圧アクチュエータを用いた高所作業車の実用化を前提としたモデリングと制御法について検討している。まず、伸縮ブーム型高所作業車の構造、駆動軸間の相互干渉等の特性について述べている。また、制御法を検討する為のモデルを、入力信号の実測結果からファジィモデルを構築する手法を提案している。次に自己調整ファジィフィードフォワードコントローラを用いた、単軸位置制御システムについて検討している。高所作業車は多軸システムであるので、非干渉化制御システムや協調制御システムについて論じている。</p> <p>その結果、次のような知見が得られた。</p> <p>① 油圧アクチュエータの非対称性や非線形性を補償し、追従特性の著しい改善に有効であり、ルール数の低減効果が大きく、CPUの負担が軽減される制御方式として、セパレート方式自己調整ファジィコントローラが有効であることが明らかとなった。</p>			



- ② 高所作業車の垂直，水平移動の複合動作の協調化問題に対し、非干渉化コントローラと協調動作コントローラを用いることにより、従来の固定ゲインP Iコントローラを用いた場合に比較して、位置誤差を約5分の1に抑えることができ、移動速度も1.4倍に高速化することができた。
- ③ 開発した複合動作システムは、操作の自動化，簡略化を図り、オペレータの負担を軽減し、実用的で高精度なシステムであることが明らかとなった。
- ④ ファジィ推論を用いた高所作業車の実用的モデリングシステムを提案し、設計者が十分利用できるリアルタイムシミュレータを開発した。

本研究で検討した制御システムは新規性に富み、学術的な価値の高いものであり、開発した制御コントローラは製品として実装され、高い評価を受けている。従って、本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと判定する。

なお、本論文の審査には鎌野琢也助教授の協力を得た。